

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

CÁLCULO DA CAPACIDADE DE INTERCÂMBIO SIMULTÂNEO
EM SISTEMAS INTERLIGADOS COM RESTRIÇÃO DE
ESTABILIDADE TRANSITÓRIA

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA
ELÉTRICA


NORBERTO DUQUE MONTOYA

FLORIANÓPOLIS, JULHO DE 1990

CÁLCULO DA CAPACIDADE DE INTERCÂMBIO SIMULTÂNEO EM SISTEMAS INTERLIGADOS COM
RESTRIÇÃO DE ESTABILIDADE TRANSITÓRIA

NORBERTO DUQUE MONTOYA

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA
ESPECIALIDADE ENGENHARIA ELÉTRICA E APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO CURSO DE
PÓS-GRADUAÇÃO.

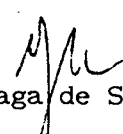

Prof. Luiz Gonzaga de Souza Fonseca, D.Sc.

Orientador

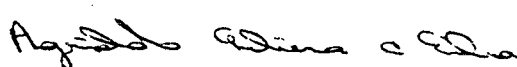

Prof. José Carlos Moreira Bermudez, Ph.D.

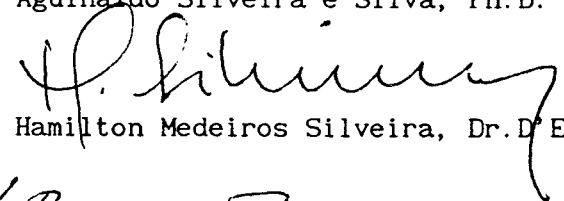
Coordenador do Curso de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica

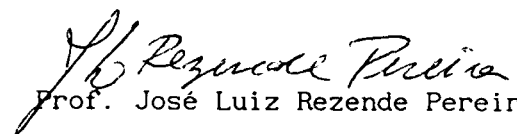
APRESENTADA PERANTE A BANCA EXAMINADORA COMPOSTA DOS PROFESSORES:


Prof. Luiz Gonzaga de Souza Fonseca, D.Sc.

Orientador


Prof. Aginaldo Silveira e Silva, Ph.D.


Prof. Hamilton Medeiros Silveira, Dr. D. Etat


Prof. José Luiz Rezende Pereira, Ph.D.

À Norberto e Rocio, meus pais.

Eles são as pessoas que mais amo e admiro. Constituem para mim o maior exemplo de vida.

À Claudia, minha esposa.

Para quem não tenho palavras certas para lhe expressar meu amor.

A G R A D E C I M E N T O S

Ao Professor Luiz Gonzaga de Souza Fonseca pela orientação, sugestões e observações precisas durante o período de realização desta Dissertação. Não posso deixar de destacar as qualidades humanas do Professor Gonzaga, que além de Profissional foi sempre um amigo.

À INTERCONEXION ELECTRICA S.A. I.S.A. pelo voto de confiança e apoio financeiro, sem os quais teria sido impossível a realização deste trabalho.

À CAPES pelo apoio financeiro.

A todos meus colegas do Curso pela amizade e incentivo com que sempre me brindaram.. Vou sempre lembrar deste período como um tempo feliz da minha vida.

Ao Engenheiro Jeferson Meneguim Ortega pela sua amizade especial.

À Gedalvo e Betinha pela amizade sincera.

Ao Mestre Carlos Roberto Minussi pela colaboração desinteressada.

Aos funcionários do Núcleo de Procesamento de Dados da UFSC por seu apoio no desenvolvimento dos aspectos computacionais do trabalho.

A todos os professores e funcionários da UFSC, especialmente do Depto. de Engenharia Elétrica, pela colaboração sempre cordial.

S U M Á R I O

Resumo	01
Abstract	02
1. INTRODUÇÃO	03.
2. LIMITES DE INTERCÂMBIO NO PLANEJAMENTO DA OPERAÇÃO	07
2.1. Introdução	07
2.2. Objetivos do Planejamento da Operação	08
2.2.1. No Horizonte do Longo Prazo	08
2.2.2. No Horizonte do Médio Prazo	08
2.2.3. No Horizonte do Curto Prazo (ou Predespacho)	09
2.3. Definição de Capacidade de Intercâmbio Simultâneo (C.I.S.) ..	10
2.4. Procedimentos atuais de Solução	11
2.5. Conclusões e Comentários	12
3. MODELAGEM MATEMÁTICA E FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DE CAPACIDADE DE INTERCÂMBIO SIMULTÂNEO	13
3.1. Introdução	13
3.2. Modelo Linearizado da Rede	14
3.3. Modelo Dinâmico do Sistema (Centro de ângulos)	15
3.4. Métodos de Análise de Estabilidade Transitória e Margens de Segurança Dinâmica	18
3.4.1. Generalidades	18
3.4.2. Métodos Numéricos	19
3.4.3. Uso da Função energia e pontos de sela.....	19

3.4.4. Método da Função energia individual.....	20
3.4.5. Método das áreas iguais extendido	21
3.4.6. Superfície Limite de Energia Potencial (SLEP).....	21
3.4.7. Método iterativo SLEP.....	23
3.5. Margens de Segurança	25
3.6. Correção da Segurança Dinâmica	26
3.6.1. Definição e generalidades.....	26
3.6.2. Análise de sensibilidade das margens de segurança dinâmica.....	26
3.7. Formulação Matemática do Problema de Capacidade de Intercâmbio Simultâneo	33
3.8. Uso da Formulação da C.I.S. para a Abordagem de alguns Problemas Práticos de Operação.	35
3.8.1. C.I.S. de importação de uma área operando em modo Global	35
3.8.2. C.I.S. de exportação de uma área operando em modo Global	36
3.8.3. Capacidade de Intercâmbio entre duas áreas componentes de um Sistema Interligado operando cada uma delas em Modo Autônomo	37
3.8.4. C.I.S. de uma área com algumas outras áreas, operando todas elas em modo Autônomo	38
3.9 Conclusões e Comentários	39
 4. PROCEDIMENTO PROPOSTO PARA SOLUÇÃO DO PROBLEMA DE CÁLCULO DA CAPACIDADE DE INTERCÂMBIO SIMULTÂNEO	 40
4.1. Introdução	40

4.2. Algoritmo de Solução	41
4.3. Descrição do Processo de otimização em cada iteração	42
4.3.1. Função Objetivo	43
4.3.2. Restrições do Processo de otimização	44
4.4. Função para Controle de Segurança Dinâmica	47
4.5. Redespacho de Segurança	49
4.6. Justificativas do Algoritmo Proposto	50
4.7. Conclusões e Comentários	51
 5. IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL DO ALGORITMO	 53
5.1. Introdução	53
5.2. Fluxograma do Algoritmo Principal	54
5.3. Descrição dos Blocos do Algoritmo Principal	54
5.3.1. Leitura de dados	54
5.3.2. Fluxo de Potência	57
5.3.3. SLEP e Análise de sensibilidade das Margens de Segurança	57
5.3.4. Montagem de restrições e Função Objetivo para Programação Linear	58
5.3.5. Programação Linear	59
5.4. Diagrama de Blocos - Relações Funcionais entre os Blocos.	60
5.5. Sugestões para Melhoria do Desempenho do Programa Computacional	60
5.6. Conclusões e Comentários.....	62
 6. EXEMPLOS DE APLICAÇÃO DA METODOLOGIA E ANÁLISE DE RESULTADOS	 63

6.1. Introdução	63
6.2. Sistema de 10 geradores.....	63
6.2.1 Capacidade de Intercâmbio Simultâneo de Importação da Área CELESC.....	65
6.2.2. Capacidade de Intercâmbio Simultâneo de Importação da Área CEEE.....	70
6.3. Sistema IEEE 118 Barras 20 Geradores.....	76
6.3.1. Capacidade de Intercâmbio Simultâneo de Importação da Área de estudo.....	78
6.3.2. Capacidade de Intercâmbio Simultâneo de Exportação da Área em estudo.....	80
6.4. Evolução do Intercâmbio, Margem de Segurança e Perdas no Processo Iterativo.....	86
6.5. Inicialização do Procedimento.....	87
6.6. Conclusões e Comentários	87
 7. CONCLUSÕES GERAIS E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	 88
7.1. Conclusões sobre o presente Trabalho de Dissertação	88
7.2. Sugestões para futuros trabalhos	91
7.2.1. Inclusão das restrições estáticas de tensão.....	91
7.2.2. Uso de técnicas especiais para a solução com Programação Linear.....	92
7.2.3. Algoritmos para inicialização do problema.....	92
7.2.4. Análise de Segurança.....	92
7.2.5. Utilização da direção S.....	93
 8. REFERÊNCIAS	 94

9.	APÊNDICE 1	Dados do Sistema Teste de 10 Geradores.....	98
10.	APÊNDICE 2	Dados de limites físicos das máquinas e térmicos pelos elementos do Sistema.....	101
11.	APÊNDICE 3	Dados do Sistema IEEE 118.....	104
12.	APÊNDICE 4	Dados de limites físicos das máquinas Sistema IEEE ...	109

R E S U M O

Este trabalho apresenta uma metodologia para o Cálculo da Capacidade de Intercâmbio Simultâneo entre Áreas componentes de um Sistema Interligado.

Trata-se de uma metodologia que, utilizando de um processo iterativo, maximiza em cada iteração o incremento de Intercâmbio Simultâneo da Área usando Programação Linear.

A metodologia proposta inclui explicitamente as restrições de Estabilidade Transitória a partir de análise de sensibilidade das Margens de Segurança Dinâmica. São também consideradas restrições de fluxo de potência ativa pelos elementos da rede e limites físicos de geração das máquinas.

Apresentam-se, ainda, detalhes do programa computacional CIS desenvolvido, assim como alguns resultados obtidos com uma rede de 45 barras, 72 linhas e 10 geradores, e com a rede IEEE 118 barras.

ABSTRACT

In this work, a methodology for the Simultaneous Interchange Capability (S.I.C.), of an control area of an Interconnected System, is presented.

The method relates to an iterative process that at each iteration using Linear Programming maximizes the incremental simultaneous area interchange, through sucessive linearization of the problem constraints.

The method includes explicitly the Transient Stability constraints coming from the Dynamic Security Margin sensibility analisys The power flow constraints are also considered on network elements and units (physical generation limits).

Finally, the computer program (CIS) developed, as well as, obtained results for a 45 bus, 72 lines and 10 machine network and the IEEE 118 bus System, are presented.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A Operação de um Sistema Elétrico, tem como objetivo principal, o suprimento da demanda de energia com adequada confiabilidade e qualidade de serviço. O crescimento da demanda, e em consequência, o crescimento dos Sistemas de Energia Elétrica, tem levado à Interligação de vários Sistemas, com o qual tem-se conseguido inúmeras vantagens, entre as quais podem ser mencionadas as seguintes:

- Aumento da confiabilidade da operação, garantindo-se a continuidade no atendimento aos usuários. Em situações de emergência, como perda de unidades geradoras ou linhas de transmissão, uma Área do Sistema pode ser socorrida pelas outras Áreas vizinhas.
- Melhoria da qualidade do serviço. Os valores de tensão e frequência, que são parâmetros para se determinar a qualidade do serviço, podem ser controlados de uma forma mais adequada, podendo ser mantidos dentro de limites pre-estabelecidos.
- Diminuição dos custos da operação do Sistema. A interligação dos Sistemas permite a otimização dos diferentes recursos de produção e transmissão de energia, podendo-se portanto, diminuir os custos da operação. Nos Sistemas Hidrotérmicos isto é mais visível. A defasagem temporal das afluências hidráulicas e a disposição espacial das bacias hidrográficas, faz com que em certos períodos do ano, algumas Áreas apresentem déficit energético, enquanto que outras, apresentam excedentes. Sendo assim, a interligação permitirá a otimização da operação dessas Áreas, diminuindo-se as perdas de energia armazenada, aumentando-se a confiabilidade do suprimento da Demanda e postergando-se eventualmente investimentos de geração.

Na atual situação econômica mundial, torna-se cada vez mais difícil obter financiamentos para o Sistema Elétrico, levando isso a atrasos na execução dos programas de expansão da geração e da transmissão. Faz-se então necessário aprofundar a pesquisa de metodologias para operar o Sistema da forma mais eficiente possível, para conseguir o melhor aproveitamento dos recursos e tirar vantagem da interligação de várias Áreas.

O Conceito de Capacidade de Intercâmbio Simultâneo apareceu na literatura no ano de 1973, [1]. Nessa referência, foi definida a "Simultaneous Interchange Capability" (S.I.C) de um Sistema Elétrico, como a máxima quantidade possível de potência de importação ou exportação, através das linhas de interligação e foi apresentada uma técnica para seu cálculo usando-se fatores de distribuição, obtidos a partir da Matriz de Impedâncias reduzida do Sistema e otimização por Programação Linear. Esta técnica foi pioneira no sentido de permitir o cálculo da S.I.C., (C.I.S. em Português), quando não somente duas mas várias Áreas estão interligadas.

Em 1976, num projeto de Dissertação desenvolvido na UFSC, [2], foi apresentada uma proposta de solução do cálculo das C.I.S, baseado na referência [1] mas com um modelo linearizado de Fluxo de Potência e com restrições estáticas da rede. Estudos exaustivos de Estabilidade Transitória da rede eram feitos para garantir que as soluções obtidas de Intercâmbio, não apresentavam instabilidade, frente a possíveis faltas tipo curto-circuito.

Em [3], foi apresentada a idéia de incluir as restrições de Estabilidade Transitória, através das curvas analíticas de St. Clair, as quais eram utilizadas para fixar limites de carregamento das linhas, baseados em margens angulares.

Em [4] é mencionada a possibilidade de utilização do Método SLEP no Cálculo das Capacidades de Intercâmbio Simultâneo, mas não é mostrado como. Nessa referência, foi desenvolvido um algoritmo para cálculo da Capacidade de

Carregamento de um Sistema Elétrico, usando o conceito de Margem de Energia e calculando-se a sensibilidade desta com relação à Demanda do Sistema.

O desenvolvimento de ferramentas para estudos de Estabilidade atingiu tal maturidade, inclusive na UFSC, que hoje torna-se possível contar com metodologias rápidas e de boa precisão baseadas em métodos diretos, como o Segundo Método de Liapunov. Um estudo de alguns dos métodos de Estabilidade Transitória é apresentado na referência [5].

O passo seguinte na área da Estabilidade Transitória, consistiu em uma proposta de solução para o problema Correção da Segurança Dinâmica do Sistema. Este problema permite decidir que ações de controle levam o Sistema, a partir de um ponto que apresenta instabilidade, a um ponto de operação Seguro.

Trabalhos nesta direção, como os das referências [7] , [8] e [9], abrem a possibilidade de se incluir restrições de Estabilidade Transitória, no problema do Cálculo das Capacidades de Intercâmbio Simultâneo.

O objetivo do presente trabalho é, então, o de propor e testar um algoritmo para Cálculo das Capacidades de Intercâmbio Simultâneo, que leve em conta, além das restrições estáticas da rede, restrições de Estabilidade Transitória. O algoritmo deverá ser automático e apresentar razoável precisão.

No desenvolvimento do presente trabalho, faz-se inicialmente no Capítulo 3, um resumo dos modelos e métodos usados e a formulação matemática do problema de cálculo da C.I.S. Ainda no mesmo Capítulo, é mostrado como pode ser usada a mesma abordagem, na solução de diversos problemas da operação de Sistemas Interligados.

Posteriormente , no capítulo 4, é apresentado o algoritmo proposto, o qual consiste de um processo iterativo com linearizações sucessivas das restrições, resolvido em cada iteração, por Programação Linear.

No Capítulo 5, são mostrados os aspectos computacionais do algoritmo, e no Capítulo 6 os testes realizados com as correspondentes análises.

Finalmente, no Capítulo 7, é feito um resumo das principais conclusões do trabalho e sugestões para futuros desenvolvimentos nesta mesma linha de pesquisa.

CAPÍTULO 2

LIMITES DE INTERCÂMBIO NO PLANEJAMENTO DA OPERAÇÃO

2.1 INTRODUÇÃO

O Planejamento da Operação de um Sistema de Energia Elétrica, procura a utilização de recursos energéticos disponíveis de forma tal que a demanda seja suprida com adequada confiabilidade e qualidade, minimizando-se os custos da operação e o risco de racionamento de energia.

Devido à complexidade do problema, faz-se necessário, para possibilitar sua solução, uma decomposição funcional e temporal.

A decomposição funcional é feita para levar em conta os diferentes aspectos envolvidos, tais como: Energia, Potência, Manutenção de Equipamentos, Análises elétricas da rede, Demandas, Hidrologias, etc.

A decomposição temporal considera o Planejamento nos Horizontes de Longo, Médio e Curto prazo (Predespacho). Em cada um desses horizontes são tomadas decisões operativas visando atingir diferentes objetivos. A descrição dos objetivos e os métodos de solução usados em cada Horizonte são apresentados neste capítulo.

Conhecidos os objetivos, é definida a CAPACIDADE DE INTERCÂMBIO SIMULTÂNEO (C.I.S.), para uma área de um Sistema composto por várias áreas interligadas.

Serão também mencionados neste capítulo, alguns dos métodos de solução do problema de C.I.S., comentando sobre o tempo usado no procedimento, precisão dos resultados, assim como da influência dos mesmos, nos custos de

operação.

2.2 OBJETIVOS DO PLANEJAMENTO DA OPERAÇÃO [10] [11]

2.2.1. No Horizonte de Longo Prazo

O objetivo desta etapa do Planejamento é tomar decisões sobre a utilização dos recursos hidráulicos e térmicos, minimizando o valor presente dos custos mensais da operação.

A metodologia empregada em geral é a Programação Dinâmica Estocástica por aproximações sucessivas ou por agregação-decomposição.

O horizonte considerado no longo prazo depende do tipo de regulação dos reservatórios do Sistema, sendo 5 anos um valor típico. O sub-período de resolução é geralmente mensal.

Os resultados obtidos nesta fase do Planejamento são políticas mensais de utilização dos reservatórios e tabelas mensais dos custos da operação futura.

Sendo assim, precisa-se de uma modelagem detalhada dos reservatórios, das afluências hidrológicas, das usinas hidrelétricas e térmicas e da demanda.

2.2.2. No Horizonte de Médio Prazo

Conhecidas as metas de geração hidráulica e térmica das usinas no Longo prazo, procura-se então uma estratégia de deplecionamento ótimo dos reservatórios para cumprir essas metas, sendo minimizadas as perdas de energia armazenada e os custos da operação.

Este processo de decisão pode ser modelado como um problema de Programação Não-Linear, resolvido por linearizações sucessivas ou simplesmente

modelado como um problema de Programação Linear.

O período do Horizonte do Médio prazo, pode ser por exemplo um ano, e o sub-período de resolução semanal.

Os resultados obtidos são programas semanais de geração térmica e hidráulica e tabelas de racionamentos.

Para fazer a conexão entre o Médio e o Curto prazo, obtem-se os custos incrementais dos reservatórios, a partir dos custos duais no horizonte do médio prazo [10].

Neste horizonte do Médio prazo, são modelados: O Sistema hidráulico, os reservatórios, as restrições de descargas dos reservatórios, as afluências hidrológicas, as curvas de duração de demanda e as limitações de geração das usinas.

2.2.3 No Horizonte do Curto Prazo (Ou Predespacho)

O objetivo do Planejamento no Curto prazo é produzir despachos horários de geração para cada usina térmica e hidráulica, minimizando-se os custos da operação, sendo esses despachos viáveis na rede elétrica disponível.

O período do horizonte pode ser uma semana, com sub-períodos de resolução horários.

Uma das metodologias de solução usada é a Programação Linear. Tem sido aproveitada a estrutura do problema para resolvê-lo usando decomposição Dantzing-Wolfe como é visto em [11].

Neste nível do Planejamento, é necessário ter uma representação detalhada do estado do Sistema, dos reservatórios, das limitações de descarga dos reservatórios, das demandas horárias de cada área do Sistema e das

restrições de geração das usinas. Além disso precisa-se levar em conta a rede elétrica para garantir-se a viabilidade dos despachos.

Uma forma de incluir as restrições elétricas da rede dentro dessa formulação, é definir como restrições do problema, as Capacidades de Intercâmbio Simultâneo de cada área (tanto de exportação como de importação), cujo cálculo será desenvolvido no presente trabalho de Dissertação.

2.3 DEFINIÇÃO DE CAPACIDADE DE INTERCÂMBIO SIMULTÂNEO (C.I.S.)

Na referência [1] foi definida a Capacidade de Intercâmbio Simultâneo (C.I.S.) como a quantidade de Potência que pode ser intercambiada entre uma Companhia e todas as outras Companhias, sem exceder as capacidades normais de carregamento dos elementos do Sistema, quando todos os elementos do Sistema estão em serviço. Em caso de perda de um circuito simples, torre de circuito duplo, ou unidade de geração, nenhum elemento deverá ser carregado acima de sua capacidade de emergência.

Para levar em conta além das restrições de transporte das linhas do Sistema, a Estabilidade Transitória, será adotada neste trabalho, uma nova definição de C.I.S. , assim:

A CAPACIDADE DE INTERCÂMBIO SIMULTÂNEO de uma área componente de um Sistema Multi-Áreas, é a quantidade de potência ativa que pode ser intercambiada entre uma área e o sistema sem exceder capacidades normais de carregamento dos elementos do Sistema, quando todos os elementos do mesmo estão em serviço. Além disso, diante de defeitos tipo curto-circuito, seguidos de abertura da linha em falta, o Sistema deverá permanecer estável.

Dito de outra forma, a Margem de Segurança do Sistema deve ser maior ou igual a zero ou que um dado valor de Margem Mínima permissível [9].

A C.I.S. pode ser de Importação ou de Exportação e é calculada para um dado valor de demanda total do Sistema.

2.4. PROCEDIMENTOS ATUAIS DE SOLUÇÃO

Na introdução foi mostrado como tem evoluído a abordagem do problema de Capacidade de Intercâmbio Simultâneo nos últimos anos. Os métodos encontrados na literatura garantem a segurança estática da rede, no entanto nada se poderia afirmar sobre a Estabilidade Transitória, no caso da ocorrência de faltas tipo curto-circuito.

Na prática os analistas de operação fazem estudos de Estabilidade Transitória para validar as soluções obtidas. Alguns dos métodos mais usados na análise transitória são estudados e comparados na referência [5]. No capítulo 3 será apresentado um resumo dos principais métodos.

Se uma solução apresenta instabilidade, faz-se necessário o redespacho de geração para obter um novo valor de C.I.S. que satisfaça, tanto as restrições estáticas, quanto as restrições de estabilidade transitória, sem mudar muito o ponto de operação. Alguns trabalhos com propostas para o referido redespacho, têm sido publicados recentemente [7], [8] e [9].

Se os estudos de estabilidade são feitos usando métodos de integração numérica, o redespacho geralmente tem que ser feito por tentativa e erro, processo cujos resultados, quanto à precisão e tempo computacional, dependem da experiência e qualidade do analista que realiza o estudo.

Como foi mencionado na introdução, faz-se cada vez mais importante operar o Sistema de forma otimizada, requerendo-se portanto uma maior precisão nos resultados do cálculo da C.I.S.. Uma estimativa muito conservativa da C.I.S. pode levar a um aumento nos custos da operação. Já uma estimativa muito otimista, pode levar a operar o Sistema com insegurança, o que pode ocasionar corte no atendimento da demanda, o que também traduz-se em perdas econômicas.

2.5 CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS

Neste capítulo foram vistos os objetivos do Planejamento da operação em cada um dos Horizontes nos quais foi decomposto o problema.

Nesse contexto do Planejamento foi mostrada a importância do Cálculo das Capacidades de Intercâmbio Simultâneo das áreas.

Uma nova definição de C.I.S. foi adotada para incluir além das restrições estáticas da rede, restrições de Estabilidade Transitória.

CAPÍTULO 3

MODELAGEM MATEMÁTICA E FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DE CAPACIDADE DE INTERCÂMBIO SIMULTÂNEO

3.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentados os modelos matemáticos a serem usados no presente trabalho:

- Modelo linearizado da rede e análise de sensibilidade dos fluxos pelas linhas.
- Modelo Dinâmico do Sistema (Centro de ângulos).

Estes modelos serão usados em:

- Métodos de Análise de Estabilidade Transitória
- Análise de sensibilidade das Margens de Segurança
- Correção da Segurança Dinâmica.

Após a modelagem matemática, é formulado o problema de cálculo da Capacidade de Intercâmbio Simultâneo (C.I.S.), para uma área componente de um Sistema Multi-áreas.

Diversos exemplos mostrarão como usar a formulação apresentada, para abordar diferentes problemas da operação de Sistemas Interligados.

3.2 MODELO LINEARIZADO DA REDE [11]

Quando as resistências série e as admitâncias "shunt" das linhas são desprezadas, a distribuição dos fluxos de potência pela rede pode ser calculada aproximadamente pelo modelo de fluxo linearizado:

$$P = [B] \theta \quad (3.2.1)$$

onde: P : Vetor de Injeções de Potência Ativa

θ : Vetor de Ângulos de Tensão nodal

$$[B]: \text{Matriz de susceptâncias} = \begin{cases} B_{kl} = -1/X_{kl} = -Y_{kl} \\ B_{kk} = \sum_l Y_{kl} \end{cases}$$

X_{kl} : Reatância do ramo k-l

Y_{kl} : Susceptância série do ramo k-l

O vetor solução de θ do Sistema linear $P = [B] \theta$, pode ser usado para calcular os fluxos na rede. O fluxo de Potência ativa T_{kl} no ramo k-l é dado por :

$$T_{kl} = \frac{\theta_k - \theta_l}{x_{kl}} \quad (3.2.2.)$$

Seja o ramo j entre os nós k e l. Então, usando-se a equação (3.2.2.) expressa em termos de acréscimos, tem-se:

$$\Delta T_j = (\Delta \theta_k - \Delta \theta_l) / X_{kl} \quad (3.2.3.)$$

que também pode ser expressa como:

$$\Delta T_j = \frac{1}{X_{kl}} e_j^t \Delta \theta \quad (3.2.4.)$$

onde e_j^t é um vetor da forma $[0 \ 0 \ \dots \ 1 \ 0 \ \dots \ -1 \ 0 \ \dots \ 0]$

Do modelo de fluxo linearizado, expressado em termos de acréscimos:

$$\Delta \theta = B^{-1} \Delta P \quad (3.2.5.)$$

substituindo em (3.2.4.)

$$\Delta T_j = \frac{1}{X_{kl}} e_j^t B^{-1} \Delta P \quad (3.2.6.)$$

Da equação (3.2.6), pode-se dizer então que o vetor de sensibilidades dos fluxos pelas linhas, em relação as potências elétricas, está dado por:

$$SF_j = \frac{1}{x_{kl}} e_j^t B^{-1} \quad (3.2.7.)$$

Para obter estas sensibilidades, pode-se fatorar a Matriz B uma vez só, e resolver por substituição direta e inversa o Sistema (3.2.7), um número de vezes igual ao número de elementos (linhas e transformadores) do Sistema Elétrico.

3.3 MODELO DINÂMICO DO SISTEMA (CENTRO DE ÂNGULOS)

O modelo adotado foi desenvolvido por Tavora e Smith [12] em 1972, usado por Athay [13] em 1979, por Fonseca e Decker [14] em 1985 e por Fonseca

e Minussi [9] em 1990.

As equações diferenciais para o movimento dos ângulos dos rotores de n geradores, em relação ao centro de ângulos tomado como referência, são dadas por:

$$M_i \ddot{\theta}_i - g_i(\theta) = 0 \quad i \in N \quad (3.3.1.)$$

onde:

$$g_i(\theta) = P_{mi} - P_{ei} - \frac{M_i}{M_T} PCA$$

$$M_i = H_i / \pi F_o$$

$$H_i = \text{Constante de inércia da } i\text{-ésima máquina}$$

$$F_o = \text{Frequência nominal da rede (60 Hertz)}$$

$$\theta_i = \text{Posição angular da } i\text{-ésima máquina referida ao Centro de ângulos}$$

$$\ddot{\theta}_i = \text{Aceleração angular da máquina } i \text{ referida ao Centro de ângulos}$$

$$P_{mi} = \text{Potência mecânica de entrada da máquina } i$$

$$P_{ei} = \text{Potência elétrica entregue pela máquina } i$$

$$PCA = \text{Potência acelerante do Centro de ângulos}$$

$$M_T = \sum_{j \in N} M_j$$

$$N = \{ 1, 2, \dots, n \} \text{ Conjunto de índices das máquinas}$$

A potência elétrica pode ser expressa, [14], por:

$$P_{ei} = -C_i f_i + D_i e_i \quad (3.3.2.)$$

onde:

$$C_i = \frac{\Delta E_i}{x'_{di}} \cos \theta_i \quad (3.3.3.)$$

$$D_i = \frac{\Delta E_i}{x'_{di}} \sin \theta_i \quad (3.3.4.)$$

$$E_i = \text{Tensão interna da máquina}$$

$$x'_{di} = \text{Reatância transitória do eixo direto}$$

Considerando-se as cargas representadas por impedâncias constantes, pode-se expressar as tensões e_i e f_i por:

$$e_i = \sum_{k \in N} (R_{ik} D_k + X_{ik} C_k) \quad (3.3.5.)$$

$$f_i = \sum_{k \in N} (-R_{ik} C_k + X_{ik} D_k) \quad (3.3.6.)$$

Onde R e X são as partes real e imaginária da sub-matriz Z_{gg} , sendo esta, a solução do Sistema de equações:

$$\begin{bmatrix} v_g \\ v_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{gg} & Z_{gl} \\ Z_{lg} & Z_{ll} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_g \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.3.7.)$$

onde:

$$v_g = [v_{g1}, v_{g2}, \dots, v_{gn}]^t$$

$$v_l = [v_{ln+1}, v_{ln+2}, \dots, v_{lm}]^t$$

$$i_g = [i_{g1}, i_{g2}, \dots, i_{gn}]^t$$

$$v_{gi} = \text{Tensão externa de geração} = e_i + j f_i$$

$$v_{li} = \text{Tensão nas barras restantes do Sistema}$$

$$i_{gi} = \frac{E_i}{x'_{di}} (\sin \theta_i - j \cos \theta_i) \quad (3.3.8.)$$

$$m = \text{número total de barras do Sistema}$$

Os subscritos g e l representam os índices relativos às barras de geração e de cargas, respectivamente.

3.4 METODOS DE ANÁLISE DE ESTABILIDADE TRANSITÓRIA E MARGENS DE SEGURANÇA DINÂMICA

3.4.1 Generalidades

O objetivo da análise de Estabilidade Transitória é estudar o comportamento do Sistema após a ocorrência de perturbações que possam afetar a Estabilidade.

O Sistema Elétrico é descrito por equações diferenciais não lineares de primeira ordem em que as variáveis de estado são desvios angulares e velocidades em relação a uma referência.

A análise de estabilidade tem sido feita resolvendo-se as equações diferenciais não lineares do sistema por métodos numéricos, ou através de métodos diretos como o segundo método de Liapunov.

Na análise transitória interessa conhecer os tempos críticos das perturbações, os quais podem ser definidos assim : Seja um Sistema operando num ponto qualquer. No instante T_0 ocorre um defeito o qual é mantido até um instante T_1 , quando atuam as proteções do Sistema. O tempo crítico será a máxima duração possível do defeito, tal que o Sistema após o tempo T_1 tenha uma evolução estável.

A determinação dos tempos críticos permite estabelecer uma margem de segurança para o ponto de operação do Sistema, ou seja, uma medida de quanto seguro esta o Sistema naquele ponto.

Em [5] os métodos de análise são classificados nos seguintes grupos:

⇒ Métodos numéricos

- ⇒ Uso da função energia e pontos de sela
- ⇒ Método da função energia individual
- ⇒ Método das áreas iguais estendido
- ⇒ Superfície limite de energia potencial (SLEP)
- ⇒ Método iterativo SLEP.

3.4.2 Métodos numéricos

Resolvendo-se as equações diferenciais por métodos numéricos, são obtidas as curvas dos ângulos dos rotores das máquinas em função do tempo. Uma análise visual das curvas, permitirá tirar conclusões sobre a perda ou não do sincronismo entre os geradores, conclusões válidas somente para uma perturbação específica e dadas condições de operação e parâmetros da rede.

Os métodos numéricos têm a vantagem de que o Sistema pode ser representado no grau de complexidade desejado. Apresentam desvantagens quanto a tempo computacional, principalmente em Sistemas de grande porte. Além disso, para a determinação de tempos críticos, precisa-se de um processo de tentativa e erro que requer no mínimo de 3 a 4 iterações e posterior análise de curvas.

3.4.3 Uso da função energia e pontos de sela

Procurando resolver as dificuldades achadas nos métodos numéricos, foram propostas metodologias alternativas envolvendo o uso de funções de Liapunov tipo energia (Gless 1966 [15], El Abiad e Nagappan 1966 [16]) e o cálculo de pontos de sela com menor valor de energia potencial para a determinação de domínios de estabilidade.

O uso do segundo método de Liapunov, permite analisar a Estabilidade Transitória, definindo uma função de Liapunov para a configuração pós-defeito. Durante a permanência do defeito, o Sistema adquire uma certa quantidade de energia que pode ser calculada com a função de Liapunov. Para verificar a estabilidade, compara-se esse valor de energia com a energia potencial do ponto de equilíbrio instável de menor energia potencial (energia crítica).

O maior problema deste método, é a obtenção de todos os pontos de sela, levando-se em conta o não conhecimento do número exato deles e os problemas de convergência dos métodos numéricos (Fonseca 1976 [17], Michel e co-autores 1983 [18]). Além de tudo isso, os resultados obtidos apresentavam tempos críticos com valores conservativos.

O problema da conservatividade motivou trabalhos que consideram a evolução da trajetória sob defeito e um ponto de equilíbrio instável de interesse (Fouad e Staton 1981 [19], Athay e co-autores 1979 [13]), sendo este ponto sela mais próximo da trajetória pós-defeito.

O uso de procedimentos de otimização e as incertezas de convergência para o ponto de sela adequado, foram as principais dificuldades observadas com essa abordagem.

3.4.4 Método da função energia individual [18]

Neste método é definida para cada máquina, uma função de energia individual composta por duas parcelas: energia cinética e energia potencial, onde esta depende dos desvios angulares de todas as máquinas do Sistema. Supõe-se que para o caso de instabilidade, a perda de sincronismo entre as máquinas depende da energia transitória individual de cada máquina ou grupo de máquinas. Verifica-se se cada máquina tem capacidade de transformar toda a

energia adquirida durante o defeito, em energia potencial após o defeito.

Cada máquina tem um valor máximo de capacidade de conversão de energia o qual é calculado examinando-se a evolução da energia potencial individual ao longo da trajetória do Sistema, supondo a falta mantida por tempo superior ao tempo crítico de eliminação da falta.

3.4.5 Método das áreas iguais extendido [22] [23]

Como o seu nome diz, trata-se de uma generalização do método das áreas iguais para um Sistema multi-máquina.

A ideia básica, é reduzir um Sistema multi-máquina a um Sistema máquina-barra infinita e aplicar o critério das áreas iguais. Isto é feito obtendo-se um número de equivalentes igual ao número de máquinas consideradas potencialmente críticas, as quais são identificadas a partir do valor de aceleração inicial quando ocorre uma falta no sistema. O tempo crítico será então o menor dos tempos críticos achados com cada um dos equivalentes. Este método apresenta problemas na identificação das máquinas potencialmente críticas.

3.4.6 Superfície Limite de Energia Potencial (SLEP) [24] [25]

O método SLEP usa a seguinte Função de Liapunov, para representar a energia total do Sistema na configuração pós-defeito:

$$E(\theta, W) = E_c(W) + E_p(\theta) \quad (3.4.6.1.)$$

$$E_c(W) = \text{Energia cinética} = \frac{1}{2} \sum_{i \in N} M_i W_i^2 \quad (3.4.6.2.)$$

$$E_p(\theta) = \text{Energia potencial} = - \sum_{i \in N} \int_{\theta^P}^{\theta_i} g_i(\theta) d\theta_i \quad (3.4.6.3.)$$

onde: $N = \{ 1, 2, \dots, n \}$ Conjunto de índices das máquinas

$$g_i(\theta) = P_{mi} - P_{ei} - \frac{M_i}{MT} PCA \quad (3.4.6.4.)$$

Seja θ^P o ponto de equilíbrio estável pós-defeito. Ao longo de direções radiais a partir do ponto θ^P , a função energia potencial é crescente. Achando os máximos valores de E_p ao longo dessas direções, pode-se caracterizar a Superfície Limite de Energia Potencial. Para achar o máximo valor de E_p ao longo de uma reta, faz-se uso do conceito de derivada direcional chegando-se a:

$$\text{Derivada direcional da energia potencial} = - \frac{1}{|\theta - \theta^P|} \langle g(\theta), (\theta - \theta^P) \rangle \quad (3.4.6.5.)$$

onde:

$\langle . . . \rangle$ = Produto interno de vetores

$(\theta - \theta^P)$ = Direção radial a partir de θ^P .

Sendo assim, pode-se definir a Superfície Limite de Energia Potencial SLEP, como sendo o conjunto de pontos $\theta \in R^n$ correspondentes aos zeros da derivada direcional, excetuando-se o ponto de equilíbrio estável do Sistema, que primeiro são alcançados quando se percorre uma direção radial a partir da origem.

Quando um defeito apresenta-se no Sistema, a trajetória evolue a partir de uma condição antes do defeito. Se o defeito for mantido o estado do Sistema poderá cruzar a SLEP, neste caso haverá perda de sincronismo [24] [25]. Uma estimativa do tempo crítico, segundo Kakimoto e Hayashi [24], é o tempo que o sistema gasta até obter um valor de energia total igual ao valor

de energia potencial crítica correspondente ao ponto de cruzamento da trajetória do Sistema com defeito mantido e a SLEP.

3.4.7 Método iterativo SLEP [24] [14] [26]

A SLEP definida no item anterior é usada num processo iterativo de cálculo da energia crítica e correspondente tempo crítico, até a convergência da solução, de acordo com uma tolerância especificada.

O processo iterativo consiste no seguinte:

- Simular a trajetória do sistema sob-defeito e monitorar ao longo da mesma, o produto escalar $g^t(\theta) (\theta - \theta^p)$, até que $g^t(\theta) (\theta - \theta^p) = 0$ seja satisfeita para algum θ^* .
- Considerar a energia potencial do estado θ^* , que pertence a SLEP, como uma primeira estimativa da energia crítica e determinar o tempo crítico de eliminação do defeito correspondente. O tempo crítico é obtido calculando-se a energia total do sistema ao longo da trajetória sob-defeito e tomando-se o instante de tempo relativo ao estado do sistema, no qual a energia total é igual à energia crítica. As trajetórias dos estados são determinadas aproximadamente por séries de Taylor.
- Simular a trajetória do sistema após a retirada do defeito, que começa no estado correspondente a primeira estimativa do tempo crítico de eliminação do defeito, e monitorar o produto $g^t(\theta)(\theta - \theta^p)$ até que seja zero para um novo θ^* , ou, até que um número máximo de passos de integração no algoritmo de simulação das trajetórias seja realizado.
- Caso o número de passos de integração ocorra sem se obter $g^t(\theta)$

$(\theta - \theta^p) = 0$, o valor da primeira estimativa é adotado como energia crítica da contingência em estudo.

- Se um novo θ^* for achado, prosseguir na determinação de novas estimativas de energia crítica, conforme o seguinte processo iterativo:

i- Encontrar inicialmente duas estimativas para a energia crítica, uma otimista e outra pessimista, demarcando respectivamente um limite superior e um limite inferior de energia. Determinados os limites , continuar o processo de modo a estreitá-los e conseguir uma melhor estimativa de energia crítica.

ii-O processo é interrompido quando uma estimativa de energia crítica for maior ou igual a um valor percentual da energia correspondente ao limite superior atual , ou o número de estimativas especificado tiver sido alcançado.

iii-A energia crítica para a contingência em estudo será a última estimativa obtida.

Em relação ao passo i, considera-se como otimista, toda estimativa de energia crítica que implica num tempo crítico de eliminação do defeito para o qual a trajetória pós-defeito cruza a SLEP para algum valor de θ . Por outro lado, uma estimativa pessimista será aquela cuja trajetória pós-defeito não cruza a SLEP no limite máximo de passos de integração especificados.

Os limites de energia são alterados toda vez que uma estimativa de energia crítica, interna a estes limites, for identificada como otimista ou pessimista.

3.5 MARGENS DE SEGURANÇA

Para se fazer um diagnóstico sobre a Estabilidade Transitória de um Sistema, associado a uma contingência r específica, foi definida em [14] a Margem de Segurança :

$$Mr = \frac{\Delta E_{crit\ r} - E_{er}}{E_{crit\ r}} \quad (3.5.1)$$

onde:

$E_{crit\ r}$ = Energia crítica total do sistema

E_{er} = Energia total correspondente ao tempo de eliminação do defeito.

A energia crítica e o tempo crítico são determinados através do método iterativo SLEP.

Para uma dada lista de contingências, é definida a Margem de Segurança Dinâmica do Sistema como sendo:

$$M = \min_i \{ M_i \} \quad i \in \text{à lista de contingências.}$$

Se for definido um valor de Margem de Segurança mínima permissível M_{min} , pode-se dizer que o Sistema é Seguro se satisfaz a condição:

$$M \geq M_{min}$$

do contrário o Sistema é considerado inseguro.

3.6 CORREÇÃO DA SEGURANÇA DINÂMICA

3.6.1 Definição e generalidades

Seja um Sistema de Energia Elétrica para o qual foi fixado um valor de Margem de Segurança mínima permissível $M_{min} \geq 0$. Seja ainda uma lista de contingências para as quais foi calculada a Margem de Segurança, como definida em 3.5. Das S contingências da lista, R apresentam Margens de Segurança menor que M_{min} .

A Correção da Segurança Dinâmica é o conjunto de ações de controle que podem ser tomadas de modo a tornar o sistema Seguro, isto é, que a Margem do Sistema seja maior ou igual a M_{min} .

Como solução ao problema de Correção de Segurança Dinâmica, tem sido achadas na literatura alternativas com redespacho [7], [8], [9]. Neste trabalho será usado o redespacho como estratégia de correção usando a formulação: Análise de sensibilidade das Margens de Segurança Dinâmica [9].

3.6.2 Análise de sensibilidade das margens de segurança dinâmica [9]

Uma ação de controle ocasiona modificações nas margens ΔMr , de modo que

$$Mr^0 + \Delta Mr \geq M_{min} \quad r = 1, 2, \dots, R \quad (3.6.2.1.)$$

onde: Mr^0 = Margem de segurança da r -ésima contingência.

A equação (3.6.2.1.), pode ser reescrita como:

$$\Delta Mr \geq M_{\min} - Mr^0$$

O acréscimo ΔMr em função das alterações dos ângulos de equilíbrio pré-falta pode ser estimado através da análise de sensibilidade de primeira ordem:

$$\Delta Mr \approx \left\langle \frac{\partial Mr}{\partial \theta^a}, \Delta \theta^a \right\rangle \quad (3.6.2.2.)$$

O superescrito ^a, refere-se ao estado de equilíbrio pré-falta.

Levando em conta que a ação de controle vai ser exercida pela variação de potência mecânica de entrada das máquinas, é necessário se estabelecer uma relação entre a variação de potência mecânica e a variação do estado de equilíbrio pré-falta. Usando-se modelo de fluxo de potência linearizado, tem-se:

$$\Delta P_m = H^a \Delta \theta^a \quad (3.6.2.3.)$$

Sendo H^a a matriz Jacobiana do segundo membro da equação (3.3.2), com relação a θ^a .

Substituindo-se (3.6.2.2.) em (3.6.2.3.), obtém-se

$$\left\langle \left[(H^a)^{-1} \right]^t \frac{\partial Mr}{\partial \theta^a}, \Delta P_m \right\rangle \geq M_{\min} - Mr^0 \quad (3.6.2.4.)$$

A sensibilidade da i-ésima margem de segurança em relação à posição angular pré-falta, após rearranjo, pode ser expressa por:

$$\frac{\partial Mr}{\partial \theta^a} = \frac{IDr \left. \frac{\partial E_{crit} r}{\partial \theta^a} \right|_{(\theta r^c, wr^c)} - \left. \frac{\partial E_{er}}{\partial \theta^a} \right|_{(\theta r^e, wr^e)}}{E_{crit} r} \quad (3.6.2.5.)$$

onde:

$$IDr = \frac{\Delta E_{er}}{E_{crit} r}$$

$$\frac{\partial(.)}{\partial \theta} = \left[\frac{\partial(.)}{\partial \theta_1} \quad \frac{\partial(.)}{\partial \theta_2} \quad \dots \quad \frac{\partial(.)}{\partial \theta_n} \right]^t$$

$$\left. \frac{\partial(.)}{\partial x} \right|_y^{\Delta} = \text{Derivada parcial de } (.) \text{ com relação a } x \text{ e avaliada em } y.$$

Os superscritos ^(c)^(e) denotam os estados correspondentes à máxima aproximação à SLEP (com eliminação de defeito em t_{crit}) e tempo de eliminação defeito, tal como é mostrado na Figura 1.

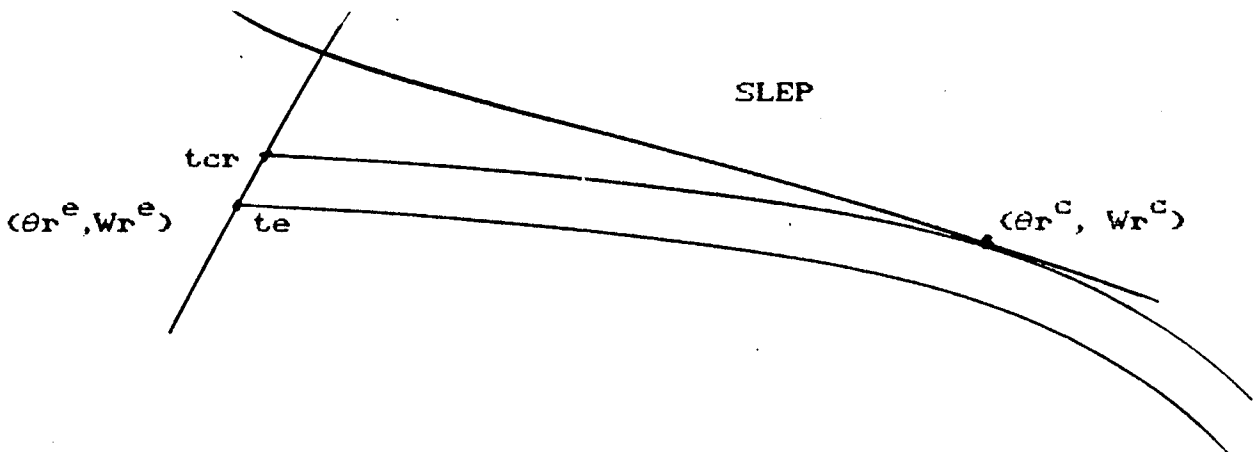


FIGURA 1 : Explicação do método SLEP.

No cálculo da expressão (3.6.2.5.) desenvolve-se-a , inicialmente, as expressões referentes à segunda parcela do numerador. Sendo assim, as componentes do gradiente são:

$$\left. \frac{\partial E_e}{\partial \theta_j^a} \right| (\theta^e, W^e) = \left. \frac{\partial E_c}{\partial \theta_j^a} \right| (W^e) + \left. \frac{\partial E_p}{\partial \theta_j^a} \right| (\theta^e) \quad (3.6.2.6.)$$

Levando em conta que :

Energia cinética : Função (W)

Energia potencial: Função (Pm, θ , θ^p)

Temos:

$$\frac{\partial E_c}{\partial \theta_j^a} = \left\langle \frac{\partial E_c}{\partial W}, \frac{\partial W}{\partial \theta_j^a} \right\rangle$$

$$\frac{\partial E_p}{\partial \theta_j^a} = \left\langle \frac{\partial E_p}{\partial P_m}, \frac{\partial P_m}{\partial \theta_j^a} \right\rangle + \left\langle \frac{\partial E_p}{\partial \theta}, \frac{\partial \theta}{\partial \theta_j^a} \right\rangle + \left\langle \frac{\partial E_p}{\partial \theta^p}, \frac{\partial \theta^p}{\partial \theta_j^a} \right\rangle$$

Sendo:

$$\frac{\partial E_c}{\partial W_j^a} = \text{Diag} (M_i, i \in N) W \quad \frac{\partial E_p}{\partial P_m} = \theta^p - \theta$$

$$\frac{\partial E_p}{\partial \theta} = P_e - P_m \quad \frac{\partial E_p}{\partial \theta^p} = P_e - P_m = 0$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial P_{mi}}{\partial \theta_j^a} = & \delta_{ij} (D_i^a f_i^{a,a} + C_i^a e_i^{a,a}) - X_{ij}^a (C_i^a C_j^a + D_i^a D_j^a) \\ & + R_{ij}^a (D_i^a C_j^a - C_i^a D_j^a) \end{aligned}$$

$$W = [w_1, w_2, \dots, w_n]^t$$

$$\theta = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n]^t$$

$$\theta^p = [\theta^p_1, \theta^p_2, \dots, \theta^p_n]^t \quad \text{ponto de equilíbrio estável pós-defeito}$$

$$P_m = [P_{m1}, P_{m2}, \dots, P_{mn}]^t$$

$$P_e = [P_{e1}, P_{e2}, \dots, P_{en}]^t$$

$$\delta_{ij} = \text{Delta de Kronecker} = \begin{cases} 1, & \text{se } i=j \\ 0, & \text{se } i \text{ diferente de } j \end{cases}$$

O superescrito (a,a) denota que a variável associada, é avaliada no estado de equilíbrio e configuração pré-defeito.

O estado (θ^e , W^e) é determinado através da solução das equações

diferenciais (3.3.1.), considerando a configuração sob-defeito e avaliada em t_e (tempo de eliminação do defeito). A expansão por séries de Taylor pode ser empregada como um método alternativo de solução numérica destas equações [26]. Assim, dados dois instantes distintos t_{h-1} e t_h , os ângulos e velocidades serão funções somente do tempo, dentro deste intervalo, com coeficientes das séries calculados em t_{h-1} . Deste modo, os gradientes de θ^e e W^e , em qualquer instante, podem ser determinados derivando-se parcialmente os coeficientes das séries através de sucessivas aproximações, da seguinte forma:

$$\frac{\partial \theta_i(t)}{\partial \theta_j^a}^d = \sum_{q=0}^s \frac{\partial \theta_i^{(q)}}{\partial \theta_j^a} \bigg|_{(t_{h-1})} \frac{(t-t_{h-1})^q}{q!} \quad (3.6.2.7.)$$

d = indica trajetória com defeito

$$\frac{\partial W_i(t)}{\partial \theta_j^a} = \frac{d}{dt} \left[\frac{\partial \theta_i(t)}{\partial \theta_j^a} \right] \quad i, j \in N \quad t_{h-1} \leq t \leq t_h \quad (3.6.2.8.)$$

A precisão destas aproximações (desconsiderando-se os resíduos), depende de alguns fatores, tais como: magnitude do período considerado, ordem das aproximações, tipo de trajetória (sob ou após -defeito).

Da equação (3.3.1.), deduz-se que:

$$\theta_i^{(1)} = W_i \quad (3.6.2.9.)$$

$$\theta_i^{(2)} = M_i^{-1} \left[P_{mi} - P_{ei} - \frac{M_i}{MT} \sum_{j \in N} (P_{mj} - P_{ej}) \right] \quad (3.6.2.10.)$$

Portanto, as derivadas temporais de ordens superiores de θ_i , são:

$$\theta_i^{(q)} = - M_i^{-1} P_{ei}^{(q-2)} + MT^{-1} \sum_{j \in N} P_{ej}^{(q-2)} \quad (3.6.2.11.)$$

$i \in N, q = 2, 3, \dots, s$

s = ordem das aproximações.

A partir da expressão de potência elétrica (3.3.2.), pode-se determinar suas derivadas temporais, como segue.

$$Pe_i^{(m)} = \sum_{q=1}^{m+1} \tau_{(m+1),q} [Di^{(m-q+1)} e_i^{(q-1)} - Ci^{(m-q+1)} f_i^{(q-1)}] \quad (3.6.2.12)$$

onde:

$$i \in N, \quad m=1,2,\dots,(s-2)$$

$$\tau_{(m+1),1} = \tau_{q,q} = 1$$

$$\tau_{(m+1),q} = \tau_{m,q} + \tau_{m,(q-1)}, \quad (m+1) \text{ diferente de } q$$

$$\text{Operador } \tau = \begin{bmatrix} 1 & & & \\ 1 & 1 & & 0 \\ 1 & 2 & 1 & \\ 1 & 3 & 3 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix}$$

$$\text{Exemplo: } \tau_{3,2} = \tau_{2,2} + \tau_{2,1}$$

$$= 1 + 1$$

As equações (3.6.2.12.) são de natureza recursiva. As derivadas temporais de C_i e D_i podem ser determinadas definindo-se:

$$p_i^{\Delta} = [DiCi]^t$$

$$A_i^{(m-q)} = \theta_i^{(m-q+1)} I^*$$

$$I^* = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}$$

Obtendo-se:

$$p_i^{(m)} = \sum_{q=1}^m \tau_{m,q} A_i^{(m-q)} p_i^{(q-1)} \quad (3.6.2.13.)$$

As equações (3.6.2.13.) são também determinadas de forma recursiva.

Portanto, para se conhecer a sensibilidade de θ_i e consequentemente de W_i em determinado instante da trajetória, com relação à posição angular θ^a , basta-se calcular:

$$\frac{\partial P_{ei}^{(m)}}{\partial \theta_j^a} = \sum_{q=1}^{m+1} \tau_{(m+1),q} \left[\frac{\partial D_i^{(m-q+1)}}{\partial \theta_j^a} e_i^{(q-1)} + D_i^{(m-q+1)} \frac{\partial e_i^{(q-1)}}{\partial \theta_j^a} - \frac{\partial C_i^{(m-q+1)}}{\partial \theta_j^a} f_i^{(q-1)} - C_i^{(m-q+1)} \frac{\partial f_i^{(q-1)}}{\partial \theta_j^a} \right] \quad (3.6.2.14.)$$

$$\frac{\partial C_i^{(m)}}{\partial \theta_j^a} = - \sum_{q=1}^m \tau_{m,q} \left[\frac{\partial \theta_i^{(m-q+1)}}{\partial \theta_j^a} D_i^{(q-1)} + \theta_i^{(m-q+1)} \frac{\partial D_i^{(q-1)}}{\partial \theta_j^a} \right] \quad (3.6.2.15.)$$

$$\frac{\partial D_i^{(m)}}{\partial \theta_j^a} = \sum_{q=1}^m \tau_{m,q} \left[\frac{\partial \theta_i^{(m-q+1)}}{\partial \theta_j^a} C_i^{(q-1)} + \theta_i^{(m-q+1)} \frac{\partial C_i^{(q-1)}}{\partial \theta_j^a} \right] \quad (3.6.2.16.)$$

Da mesma forma, as sensibilidades de e_i e f_i , são calculadas, derivando-se parcialmente as equações (3.3.5.) e (3.3.6.).

As expressões desenvolvidas anteriormente, são suficientes para a obtenção da sensibilidade da energia total, correspondente ao instante da eliminação do defeito. Falta somente o cálculo da sensibilidade da energia total crítica em relação à posição angular pré-falta.

Faz-se então, a seguinte consideração : Toda alteração promovida que represente um aumento em E_{crit} , diminuirá na mesma proporção a energia total do sistema, quando avaliada no instante t crítico.

Sendo assim, pode-se fazer a seguinte aproximação :

$$\left. \frac{\partial E_{crit}}{\partial \theta^a} \right|_{(\theta^c, W^c)} = - \left. \frac{\partial E}{\partial \theta^a} \right|_{(\theta(t_{critico}), W(t_{critico}))} \quad (3.6.2.17.)$$

A quantidade $\frac{\partial E}{\partial \theta^a}$, pode ser determinada através do uso de séries de potências, conforme proposto acima, sem custo computacional adicional, bastando-se apenas armazenar o valor da sensibilidade correspondente ao instante t crítico na trajetória sob-defeito.

Com as expressões desenvolvidas acima, pode-se obter a sensibilidade da margem com relação às potências mecânicas de cada máquina. estas sensibilidades podem ser usadas para a indicação de alterações no redespacho que resultem em melhoria da segurança.

3.7 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DO PROBLEMA DE CAPACIDADE DE INTERCÂMBIO SIMULTÂNEO

Seja um sistema elétrico composto por varias áreas interligadas. As linhas que interligam uma área A com qualquer das outras áreas, são chamadas de linhas de interligação de A .

Calcular a C.I.S. para uma área equivale a :

$$\text{Maximizar } FO = \sum_{i=1}^{NLI} T_i \quad (3.7.1.)$$

onde:

NLI = Número de linhas de interligação

T_i = Fluxo de potência ativa através da linha de interligação i

Sujeito as restrições :

1- Limitações de fluxo de potência ativa pelos elementos do sistema

$$T_{Min\ i} \leq T_i \leq T_{Max\ i} \quad (3.7.2.)$$

2- Limitações físicas das máquinas:

$$P_{Mini} \leq P_{Mi} \leq P_{Maxi} \quad (3.7.3.)$$

3- Balanço de potência:

$$\sum_{i \in N} P_{mi} = \text{Demanda}$$

4- Estabilidade transitória:

Para uma dada Lista de S contingências, a Margem de Segurança do Sistema, como definida em 3.5. , deve satisfazer:

$$M \geq M_{min}$$

Note-se que, embora esteja-se calculando a C.I.S. para uma área do sistema, o conceito de margem de segurança abrange o sistema total.

O valor de C.I.S. para uma área pode ser de Importação ou de Exportação.

Para a C.I.S. de Importação, assume-se como positivos os fluxos de potência ativa que "entram" na área A.

Para a C.I.S. de Exportação assume-se como positivos os fluxos de potência ativa que "saem" da área A.

É importante ressaltar que o valor de C.I.S. é calculado fixando como parâmetro um dado valor de demanda total do Sistema.

Com o objeto de diminuir esforço computacional, na prática são calculadas as C.I.S. somente para tres valores típicos de demanda: Máxima, média e mínima.

3.8 USO DA FORMULAÇÃO DA C.I.S. PARA A ABORDAGEM DE ALGUNS PROBLEMAS PRÁTICOS DE OPERAÇÃO

Para efeitos deste trabalho de dissertação, a operação de uma área componente de um sistema interligado vai ser classificada em dois possíveis modos : Modo global e Modo autônomo.

Modo global: Vários Sistemas Interligados operam com critérios de otimização Global: mínimo custo da operação do sistema total, com níveis de qualidade de serviço padronizados.

Modo Autônomo: Cada um dos sistemas que compõem o sistema interligado, opera com critérios autônomos de otimização e qualidade de serviço.

A formulação do cálculo de C.I.S. pode ser usada na abordagem de alguns problemas práticos da operação . Para ilustrar algumas aplicações serão mostrados os seguintes exemplos:

- ⇒ C.I.S. de importação de uma área operando em modo global
- ⇒ C.I.S. de exportação de uma área operando em modo global
- ⇒ Capacidade de intercâmbio entre duas áreas componentes de um sistema interligado operando cada uma delas em modo autônomo.
- ⇒ C.I.S. de importação de uma área com algumas outras áreas, operando todas elas em modo autônomo.

3.8.1 C.I.S de importação de uma área operando em Modo Global

Seja o Sistema Interligado mostrado na Figura 2.

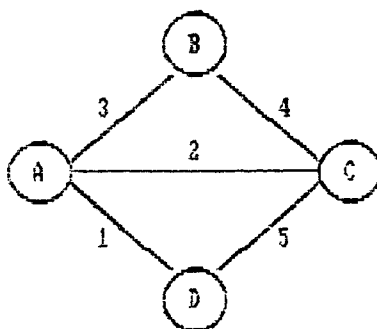


Figura 2 Sistema Interligado.

Assume-se a seguinte convenção:

T_{1DA} = Fluxo de potência ativa pela linha 1 indo da área D para a área A.

O sistemas A, B, C, e D da figura 2 operam em Modo Global.

Calcular a C.I.S. de importação da área A, é maximizar a função objetivo :

$$F O = T_{1DA} + T_{2CA} + T_{3BA}$$

sujeito as restrições vistas em 3.7.

3.8.2. C.I.S de exportação de uma área operando em Modo Global

Os sistemas A, B, C, e D da figura 2 operam em Modo Global.

Calcular a C.I.S. de exportação da área A, é maximizar a função objetivo :

$$F O = T_{1AD} + T_{2AC} + T_{3AB}$$

sujeito as restrições vistas em 3.7.

3.8.3. Capacidade de intercâmbio entre duas áreas componentes de um sistema interligado operando cada uma delas em Modo Autônomo.

No sistema interligado da figura 2, as quatro áreas operam em Modo Autônomo. Para uma dada condição de demanda, cada Sistema de acordo com seus objetivos de otimização, fixa seu despacho de geração e seus contratos com as outras áreas. Deseja-se conhecer, a partir dessa condição inicial, quanto poderia ser o intercâmbio adicional entre as áreas D e A, sendo esta última a área importadora.

Para abordar este problema, calcula-se primeiramente para o ponto de operação inicial o valor do intercâmbio inicial, como sendo:

$$\text{Intercâmbio inicial da área A} = T_{1DA}^0 + T_{2CA}^0 + T_{3BA}^0$$

Onde o índice 0, indica condição inicial.

Conhecendo o intercâmbio inicial, maximiza-se a função objetivo:

$$F O = T_{1DA} + T_{2CA} + T_{3BA}$$

Sujeito à :

- 1- Limitação de fluxo de potência ativa pelos elementos do sistema.
- 2- Limitação física das máquinas, levando em conta que para as máquinas das áreas B e C, os limites de geração , máximo e mínimo, são iguais ao valor de geração da condição inicial, isto quer dizer que no processo de otimização, não vão ser variáveis de decisão, vão

permanecer fixas.

3- Balanço de potência

4- Estabilidade Transitória

A solução deste problema é chamada de Intercâmbio final da área A.

Após o processo de otimização, calcula-se a Capacidade de intercâmbio adicional das áreas D e A como:

Intercâmbio final de A - Intercâmbio inicial de A

3.8.4. C.I.S. de uma área com algumas outras áreas, operando todas elas em modo autônomo

No sistema interligado da figura 2, as quatro áreas operam em modo autônomo.

Deseja-se conhecer a partir de uma condição inicial, quanto pode ser o intercâmbio adicional (como explicado em 3.8.3.) entre as áreas A e B com a área D, sendo esta última, área importadora.

Para resolver este problema, calcula-se o intercâmbio inicial da área D como:

$$\text{Intercâmbio inicial da área D} = T_{1AD}^0 + T_{SCD}^0$$

Conhecido o intercâmbio inicial, maximiza-se a função objetivo:

$$F O = T_{1AD} + T_{SCD}$$

Sujeito a :

- 1- Limitação de fluxo de potência ativa pelos elementos do sistema
- 2- Limitações físicas das máquinas, levando em conta que para as máquinas

da área C, os limites de geração, máximo e mínimo, são iguais ao valor de geração da condição inicial.

3- Balanço de potência

4- Estabilidade Transitória

A solução deste problema, é chamada de intercâmbio final da área D.

Após o processo de otimização, calcula-se a Capacidade de Intercâmbio adicional entre as áreas A e B com a área D, como sendo:

Intercâmbio final de D - Intercâmbio inicial de D

3.9 CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS

Foi visto neste capítulo, um resumo dos modelos usados neste trabalho de Dissertação, assim como de alguns dos métodos de análise de Estabilidade Transitória achados na literatura especializada.

Adotou-se o método iterativo SLEP e análise de sensibilidade das Margens de Segurança, como ferramentas para incluir dentro da metodologia a ser proposta, para resolver o problema de Capacidade de Intercâmbio Simultâneo num sistema de potência.

A formulação matemática do problema de cálculo de C.I.S. foi apresentada. Também foi mostrado como pode ser usada a mesma formulação, na abordagem de diversos problemas de Intercâmbio na operação de sistemas de potência.

Cabe ressaltar que, de acordo com a formulação apresentada de cálculo de C.I.S., quando são definidas as linhas de interligação, estão sendo implicitamente definidas duas áreas: uma de Exportação e outra de Importação.

No capítulo seguinte é apresentado um procedimento para solução do problema de cálculo da Capacidade de Intercâmbio Simultâneo.

CAPÍTULO 4

PROCEDIMENTO PROPOSTO PARA SOLUÇÃO DO PROBLEMA DE CÁLCULO DA CAPACIDADE DE INTERCÂMBIO SIMULTÂNEO

4.1 INTRODUÇÃO

Será apresentada neste capítulo, uma proposta de solução do problema de cálculo da Capacidade de Intercâmbio Simultâneo (C.I.S.) de uma área, tomada como componente de um Sistema Interligado.

O algoritmo proposto, consiste de um procedimento iterativo. Em cada iteração são linearizadas as restrições estáticas da rede e as restrições de estabilidade transitória, por análise de sensibilidade. Além disso, é maximizado o incremento de Intercâmbio Simultâneo da área. Este incremento é definido como sendo a soma dos incrementos de fluxo de potência ativa pelas linhas de interligação da área. Na solução do problema usa-se a Programação Linear, porque tanto a Função Objetivo, quanto as restrições, são lineares. Algumas justificativas da escolha do algoritmo são feitas, levando em conta a natureza e características do problema.

Em relação aos métodos de solução para cálculo da capacidade de intercâmbio, destaca-se como particularidade do método proposto, a inclusão explícita de restrições de Estabilidade Transitória. Observa-se também, que trata-se de um algoritmo automático de solução, evitando-se o processo de tentativa e erro .

Dentro da metodologia proposta, são incluídos :um algoritmo para

correção da Segurança Dinâmica e um Redespacho de Segurança.

4.2 ALGORITMO DE SOLUÇÃO

O Algoritmo pode ser descrito pelos seguintes passos:

PASSO 01

Ler : ⇒ Despacho inicial

 ⇒ Dados do sistema (Rede, dados de rotores, inércias ,etc.)

 ⇒ Identificação das linhas de interligação da área em estudo

 ⇒ Lista de contingências consideradas

 ⇒ Limites físicos das máquinas e térmicos dos elementos do Sistema
 (Linhas e transformadores)

PASSO 02

Calcular a sensibilidade dos fluxos pelas linhas em relação as potências mecânicas.

PASSO 03

Rodar Fluxo de Potência, calcular tensões, ângulos e fluxos de potência ativa iniciais pelos elementos do Sistema.

PASSO 04

Fazer análise de Estabilidade Transitória com o programa SLEP e análise de sensibilidade das Margens de Segurança para as contingências que apresentam margem de segurança menor ou igual a um valor especificado a priori (tem sido usado 0,3)

Achar a Margem de Segurança do Sistema.(Como visto na seção 3.5.)

PASSO 05

Montar a tabela de restrições para Programação Linear e definir a Função Objetivo como a soma dos incrementos de fluxo de potência ativa pelas Linhas

de Interligação da área em estudo.

A restrição, incremento de intercâmbio maior do que zero, é incluída na tabela de restrições.

PASSO 06

Maximizar a Função Objetivo Incremento de Intercâmbio, usando Programação Linear. (P.L.)

PASSO 07

Se P.L. for inviável, ir ao PASSO 09

Se P.L. for viável, ir ao PASSO 08

PASSO 08

A solução da Programação Linear é definida como o novo valor de C.I.S. da área em estudo. Depois, ir ao PASSO 03

PASSO 09

Verificar Margem de Segurança do Sistema:

Se Margem \geq Mmin, ir ao PASSO 11

Se Margem $<$ Mmin, ir ao PASSO 10

PASSO 10

Fazer Redespacho de Segurança

PASSO 11

A C.I.S. será a última saída viável da Programação Linear, com Margem de Segurança corrigida por Redespacho, se necessário.

Imprima os resultados e pare.

4.3 DESCRIÇÃO DO PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO EM CADA ITERAÇÃO

4.3.1. Função Objetivo

Em cada iteração, maximiza-se a Função Objetivo:

$$F.O. = \sum_{i=1}^{NLI} \Delta T_i \quad (4.3.1.1.)$$

onde :

NLI = Número de linhas de interligação

ΔT_i = Acréscimo de fluxo de potência ativa pelo elemento i do Sistema (como definido na equação (3.2.6.))

Usando a equação (3.2.7.) e substituindo-se em (3.2.6.), obtém-se:

$$\Delta T_i = SF_i \Delta P_m \quad (4.3.1.2.)$$

As variáveis de decisão adotadas no processo de otimização, são os acréscimos de potências mecânicas. A partir das equações (4.3.1.2.), podemos obter o sistema de equações lineares:

$$\Delta T = SFM \Delta P_m \quad (4.3.1.3.)$$

onde:

ΔT = Vetor de $nl \times 1$, sendo nl o número de elementos do sistema

SFM = Matriz $nl \times n$, sendo n o número de máquinas.

Cada linha i da matriz SFM , contém as sensibilidades do fluxo de potência ativa pelo elemento i em relação às potências mecânicas (foram eliminados todos os demais elementos)

ΔP_m = Vetor $n \times 1$ de acréscimos de potência mecânica

Sendo assim, a Função Objetivo como definida em (4.3.1.1.), ficará expressa pela seguinte equação :

$$F.O. = \sum_{i=1}^{NLI} C_i \Delta P_{mi} \quad (4.3.1.4.)$$

onde:

$$C_i = \sum_{k \in LI} SFM(i, k) \quad (4.3.1.5.)$$

$LI = \{ \text{Conjunto que contém os índices das linhas de interligação da área em estudo} \}$

Esta Função Objetivo é Linear.

Observa-se que de acordo com a convenção definida em 3.7, a F.O. (4.3.1.4.) pode ser de incremento de intercâmbio de importação ou exportação, sendo uma das funções objetivo a simétrica da outra.

4.3.2. Restrições do processo de otimização

As restrições consideradas são as seguintes:

- 1- Limites dos acréscimos de fluxo de potência ativa pelos elementos do sistema :

$$\Delta T_{\min i} \leq \Delta T_i \leq \Delta T_{\max i} \quad i = 1, 2, \dots, n_l$$

onde:

$$\Delta T_{Min\ i} = T_{Min\ i} - T_i^0$$

$$\Delta T_{Max\ i} = T_{Max\ i} - T_i^0$$

2- Limites dos acréscimos de potência mecânica

Quando as equações do sistema elétrico são linearizadas em torno de um dado ponto de operação, as expressões obtidas têm validade, só numa região em torno daquele ponto.

Uma forma de considerar a região de validade, é limitar as variáveis de decisão do problema, acréscimos de potência mecânica das máquinas, a um certo porcentagem do valor da potência nominal das máquinas (Por exemplo 10% por cento).

Sendo assim, tem-se:

$$\Delta P_{Min\ i} \leq \Delta P_{Mi} \leq \Delta P_{Max\ i} \quad i \in N$$

onde $\Delta P_{Min\ i}$ e $\Delta P_{Max\ i}$, são definidos de acordo com o seguinte algoritmo:

$$\Delta P_{Min\ i} = P_{Min\ i} - P_m^0$$

$$\Delta P_{Max\ i} = P_{Max\ i} - P_m^0$$

Se $|\Delta P_{Min\ i}| > 0.10 P_{nom\ i}$, então faça $\Delta P_{Min\ i} = -0.10 P_{nom\ i}$

Se $|\Delta P_{Max\ i}| > 0.10 P_{nom\ i}$, então faça $\Delta P_{Max\ i} = 0.10 P_{nom\ i}$

onde:

$|\quad|$ representa a função Valor absoluto.

P_{nom} = Potência nominal

3- Balanço de potência:

$$\sum_{i \in N} \Delta P_{mi} = 0.0$$

4- Estabilidade Transitória

A Estabilidade Transitória, é considerada através das sensibilidades das Margens de Segurança, como mostrado na equação (3.6.2.4.), assim:

$$\left\langle \left[(H^a)^{-1} \right]^t \frac{\partial M_r}{\partial \theta^a}, \Delta P_m \right\rangle \geq M_{\min} - M_r^0$$

$$r = 1, 2, \dots, NC$$

onde:

NC = Número de contingências críticas, ou seja, com margem menor do que um dado valor especificado.

O valor de margem mínima (Mmin), é fixado em cada iteração, em função do valor da Margem de Segurança do Sistema, como será mostrado na seção 4.4..

5- Restrição de incremento de intercâmbio simultâneo positivo

$$\sum_{i=1}^{NLI} C_i \Delta P_{mi} > 0.0$$

onde C_i , $i = 1, 2, \dots, NLI$, são quantidades como definidas em (4.3.1.5.).

Esta restrição foi incluída no processo de otimização, para garantir que o algoritmo vai indo sempre em uma direção que aumenta o intercâmbio da área em estudo.

4.4 FUNÇÃO PARA CONTROLE DE SEGURANÇA DINÂMICA

Na referência [27], é apresentado o conceito de Esforço de Deslocamento da Margem como sendo uma função que relaciona a margem de segurança inicial e a margem de segurança final (objetivo a ser atingido), da seguinte forma:

$$\varepsilon = \frac{1 - M^0}{1 - M_A} - 1 \quad (4.4.1.)$$

onde:

ε = Esforço de Deslocamento da Margem de Segurança

M^0 = Margem de segurança inicial

M_A = Margem de segurança final a ser obtida (margem de segurança alvo)

Esta função, definida a partir dos resultados obtidos com vários casos de redespacho visando a melhoria da segurança, ilustra o fato de que, quando a margem de segurança é muito negativa, pequenas mudanças no despacho em geral resultam em grandes modificações no valor da margem. Se a margem é positiva, são necessárias grandes mudanças no despacho para se obter pequenas melhorias de segurança.

Fixando um valor de margem inicial M^0 , por exemplo -2,00, pode-se observar o comportamento do esforço em função da margem objetivo, no seguinte gráfico (Gráfico 01).

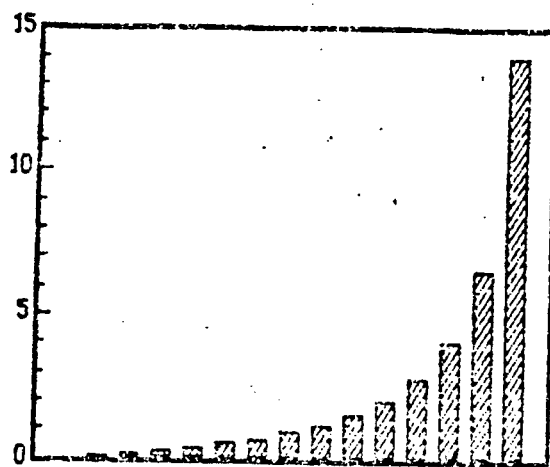


Gráfico 01 : Esforço de deslocamento versus margem objetivo

O Esforço de Deslocamento da Margem (ξ), traduz-se em um aumento de iterações no processo iterativo de correção da Margem de Segurança, segundo mostrado em [27]. Isto quer dizer, que a quantidade de Megawatts redespachados será maior, quanto maior for o Esforço de Deslocamento.

Levando em conta essas observações, e considerando que quando foram limitados os acréscimos de potência mecânica, um valor máximo de megawatts foi fixado para fazer a correção da segurança numa iteração dada, foi adotado o seguinte algoritmo Heurístico para definir o alvo de segurança em função da Margem de Segurança do Sistema, em uma dada iteração do processo de cálculo da Capacidade de Intercâmbio Simultâneo.

Seja M a Margem de Segurança do Sistema como definida em 3.5.

Se $-\infty \leq M \leq -2.0$ Alvo de segurança = -1.0

Se $-2.0 \leq M \leq -1.0$ Alvo de segurança = 0.0

Se $-1.0 \leq M \leq 0.0$ Alvo de seguramca = 0.05

Se $0.0 \leq M \leq 0.2$ Alvo de segurança = 0.20

Se $0.2 \leq M \leq 0.25$ Alvo de segurança = 0.25

Se $0.25 \leq M \leq 0.30$ Alvo de segurança = 0.30

4.5 REDESPACHO DE SEGURANÇA

Precisa-se fazer Redespacho de Segurança, quando dentro do processo iterativo de procura da Capacidade de Intercâmbio Simultâneo, chega-se a um ponto de operação no qual:

- 1- Não é possível obter mais um incremento de intercâmbio.
- 2- A Margem de Segurança do Sistema nesse ponto é negativa.

O Redespacho de Segurança consiste em uma iteração igual à descrita no item 4.3, só que relaxando a restrição 5 para:

$$\sum_{i=1}^{NLI} C_i \Delta P_{mi} > -b \quad (4.5.1.)$$

onde b é uma quantidade real positiva.

O valor de b , deve ser ajustado adequadamente para cada área que esteja se estudando.

Esta restrição pode ser interpretada assim: O intercâmbio simultâneo pode ser diminuído até b Megawatts, na busca de um ponto de operação Seguro. Com isto fica permitido um acréscimo negativo de intercâmbio, o que viabiliza modificações no despacho e a obtenção de margens de segurança positiva.

Uma estimativa do valor de b , pode ser feita assim:

Sempre que é calculada a C.I.S, o Sistema está sendo dividido em duas áreas, uma Importadora e outra Exportadora. Já que os acréscimos de potência mecânica foram limitados a um porcentagem, p , das capacidades nominais, o valor máximo que pode aumentar o intercâmbio numa iteração é dado por:

$$\text{Min } \{ \begin{array}{l} p \% \text{ da capacidade total das usinas da área} \\ \text{importadora} , \quad p \% \text{ da capacidade total das usinas} \\ \text{da área exportadora} \end{array} \}$$

Pode-se então estimar b , como uma porcentagem desse valor máximo possível.

4.6 JUSTIFICATIVAS DO ALGORITMO PROPOSTO

As características que apresenta o problema de cálculo das C.I.S., tal como definido no presente trabalho, são entre outras, as seguintes:

- 1- As equações que modelam o sistema elétrico, são de natureza não linear.
- 2- As restrições consideradas são de dois tipos:

Estáticas (Fluxos, limitações das máquinas, balanço de potência)

Dinâmicas (Estabilidade transitória)

Outros aspectos considerados dentro do problema são:

- 1- A procura de um método automático de solução, que elimine o processo de tentativa e erro.
- 2- A necessidade de se obter resultados com razoável precisão.
- 3- A necessidade de um procedimento que seja computacionalmente rápido.

A característica de não linearidade do problema levou à escolha de um

processo iterativo.

O fato de se ter na literatura modelos de linearização das restrições estáticas e dinâmicas envolvidas no problema, permitiu as linearizações sucessivas no processo iterativo, além disso, a utilização da Programação Linear como ferramenta de otimização .

A Função Objetivo adotada no problema de P.L., expressa o incremento de intercâmbio em forma linearizada, sendo essa uma boa direção de procura da solução do problema, já que descreve diretamente a quantidade que se deseja maximizar.

O método de Análise de Estabilidade Transitória SLEP , tem mostrado desempenho adequado, quanto à precisão e tempo computacional, tal e como é mostrado na referência [5]. Daí, a sua escolha dentro do algoritmo. Além disso, a análise de sensibilidade das Margens de Segurança foi desenvolvida, com base nessa metodologia. A limitação nas variáveis de decisão do problema, foi feita levando em conta que quando se lineariza o sistema num dado ponto, as aproximações obtidas só tem validade numa certa região em torno desse ponto.

No processo do Redespacho, a formulação do problema garante a procura de um ponto de operação seguro, na direção contrária àquela que foi usada para incrementar o intercâmbio. Quando é obtido um ponto de máximo intercâmbio inseguro, o valor do intercâmbio é diminuído até se obter um ponto Seguro.

4.7 CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS

Neste capítulo foi apresentada uma proposta de solução ao problema de

cálculo da Capacidade de Intercâmbio Simultâneo.

As características mais relevantes do método proposto são as seguintes:

- A C.I.S. para uma área do sistema interligado, é obtida mediante um processo iterativo.
- São incluídas, além das restrições estáticas de fluxo e limites físicos das máquinas, restrições de Estabilidade Transitória, mediante o uso do Método Iterativo SLEP.
- O algoritmo de solução é automático. A partir de um despacho inicial, é calculada a Capacidade de Intercâmbio Simultâneo.
- Em cada iteração, é otimizado o incremento de intercâmbio, sendo linearizadas as restrições do problema.

No capítulo seguinte é descrita implementação computacional do algoritmo proposto e, no capítulo 6, exemplos ilustrativos.

CAPÍTULO 5

IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL DO ALGORITMO

5.1 INTRODUÇÃO

No presente capítulo, serão descritos os aspectos computacionais da implementação do programa CIS, para cálculo da Capacidade de Intercâmbio Simultâneo.

Inicialmente, mostra-se o fluxograma do algoritmo principal e são dadas algumas explicações sobre os blocos componentes.

Na implementação do algoritmo, foram utilizados vários programas computacionais já desenvolvidos e disponíveis no Departamento de Engenharia Elétrica da UFSC, além do desenvolvimento de novos programas.

As características funcionais de todos os programas usados e a forma como eles estão relacionados no algoritmo principal, será visto neste capítulo.

Tendo este trabalho de Dissertação como objetivo o desenvolvimento de uma metodologia de cálculo da capacidade máxima de intercâmbio, a implementação computacional não foi completamente otimizada. No final do capítulo são dadas algumas sugestões para uma implementação mais eficiente.

5.2 FLUXOGRAMA DO ALGORITMO PRINCIPAL

Na figura 3, mostra-se o fluxograma do algoritmo principal, correspondente ao processo iterativo de cálculo da C.I.S.

Nesse fluxograma, podem ser destacados os seguintes blocos:

- 1- Leitura de dados
- 2- Fluxo de Potência
- 3- SLEP e Análise de Sensibilidade das Margens de Segurança
- 4- Montagem das restrições e Função Objetivo para Programação linear.
- 5- Programação Linear.

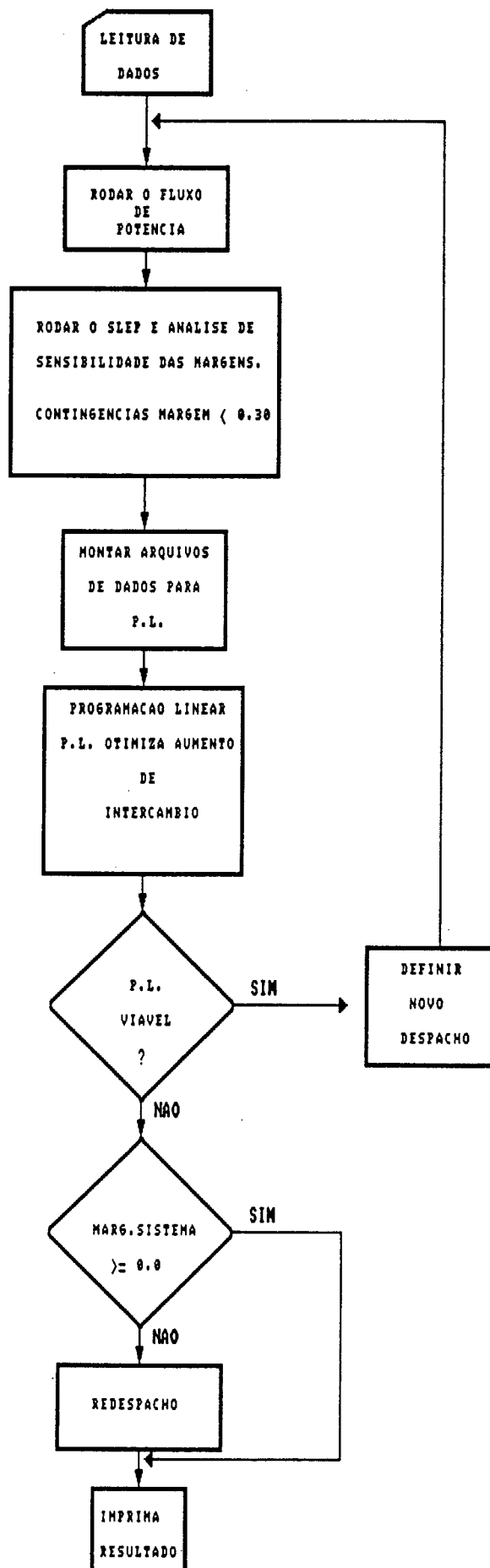
A implementação do algoritmo principal foi feita em Linguagem REXX, a qual é uma Linguagem de programação de alto nível para os computadores IBM, que pode ser usada, além da programação normal, para processamento de comandos do Sistema Operacional. Sendo assim, foi possível a utilização de vários programas que estavam desenvolvidos em distintas linguagens de programação e que eram rodados em Sistemas Operacionais distintos.

Nos seguintes itens são descritos os blocos mencionados acima.

5.3 DESCRIÇÃO DOS BLOCOS DO ALGORITMO PRINCIPAL

5.3.1. Leitura de dados

Vários arquivos de dados são usados pelos programas:



1- SLEP DADOS A

Contém os dados necessários para rodar o programa SLEP, no qual foi também incluída a análise de sensibilidade das margens de segurança. Os dados são:

- Margem mínima permissível
- Valor limite de margem, para decidir quais contingências têm análise de sensibilidade.
- Intervalo de integração das séries de Taylor para cálculo das trajetórias do sistema e ordem das aproximações.
- Dados dos rotores das máquinas, para o modelo dinâmico do sistema.
- Lista de contingências com indicação da barra em curto e tempo de abertura dos disjuntores do elemento em falta.

2- BIGPOWERMOD

Contém os dados referentes ao programa de Fluxo de Potência BIGPOWERMODE.

3- PL DADOS A

Contém dados para o programa P.L., o qual monta as restrições e a função objetivo para otimização por Programação Linear. Tais dados são:

- Porcentagem da potência nominal dos geradores, o qual define os limites para os acréscimos de potência mecânica.
- Limites de geração máxima, mínima e nominal dos geradores.
- Valores R e X das linhas e limite térmico das mesmas.
- Identificação da barra de folga
- Número de geradores
- Número de elementos da rede (Linhas, transformadores, etc).
- Para cada elemento do Sistema, o vetor das sensibilidades dos fluxos de potência ativa, em relação as potências mecânicas (Sensibilidades calculadas num processo à parte do programa principal).
- Número de linhas de interligação e identificação das mesmas.

- Valor "b" da área, tal e como definido em 4.5.

4- PL SAID1 A

Contém o despacho inicial usado no processo iterativo.

Este arquivo vai sendo modificado após cada iteração, contendo sempre o último despacho obtido.

5.3.2. Fluxo de Potência

O programa Fluxo de Potência usado é o BIGPOWERMODE, o qual emprega o Método Newton-Raphson com uma inicialização por Gauss-Seidel.

Este programa é rodado no Sistema operacional MVS .

Os dados do sistema são tomados de arquivos históricos gravados em unidades de disco do Computador IBM 3090.

As saídas do Fluxo de Potência, são também gravadas em unidades de disco e na "Reader" virtual da máquina onde esta sendo rodado o programa CIS.

5.3.3. SLEP e análise de sensibilidades das Margens de Segurança

O SLEP é um programa que realiza Análise de Estabilidade Transitória de um Sistema Elétrico pelo Método Iterativo SLEP (3.4.6. e 3.4.7).

Os arquivos de dados necessários na execução do SLEP são:

1- SLEP DADOS A (Visto em 5.3.1.)

2- FILE OUT C

Arquivo que contém a saída do Fluxo de Potência. Este arquivo é trazido da

unidade de disco para um disco temporário.

O SLEP é rodado no Sistema Operacional CMS e está desenvolvido em Linguagem de Programação Fortran IV.

Os arquivos de saída, são os seguintes:

1- SLEP1 LISTING A

Arquivo que contém Listas de contingências com seus correspondentes tempos críticos e Margens de Segurança. Listas de contingências ordenadas de acordo com o grau de severidade.

2- SLEP2 LISTING A

Contém sensibilidades das Margens de Segurança, direções S das principais contingências e tensões nas barras do Sistema.

Este arquivo provê dados para o programa que monta as restrições para Programação Linear.

5.3.4. Montagem de restrições e Função Objetivo para Programação Linear

Programa em linguagem Fortran 77, que monta o " Tableau" para Programação Linear. Além disso, o programa constrói a Função Objetivo a partir da informação das linhas de interligação.

Os arquivos que suprem os dados deste programa, são os seguintes:

1- PL DADOS A

Descrito em 5.3.1..

2- SLEP2 LISTING A

Descrito em 5.3.3..

As saídas do programa são:

1- PL LINEAR A

Contendo tabela de restrições, função objetivo, e limites superiores das

variáveis de decisão.

2- PL SAI A

Contém: Fluxos pelos elementos do sistema, folgas nos fluxos de acordo com limites térmicos, valor da C.I.S. calculada e a Margem de Segurança correspondente a última condição operativa.

5.3.5. Programação Linear

Contém o programa LINEAR, de otimização por Programação Linear, usando o Método Simplex Dual, no qual são considerados limites superiores para as variáveis.

O programa foi desenvolvido em Linguagem de Programação Fortran 77 e é rodado no Sistema Operacional CMS.

Os dados do programa são obtidos do arquivo PL LINEAR A (Visto em 5.3.4.).

As saídas são as seguintes:

1- PL SAIDA A

Arquivo onde aparecem os valores ótimos das variáveis de decisão.

2- PL SAID1 A

Arquivo detalhado em 5.3.1.

3- FLAG ENTR A

Arquivo de controle do algoritmo.

Tem o valor 1 se o problema de P.L. é viável.

Tem o valor 2 se o problema de P.L. é inviável.

5.4. DIAGRAMA DE BLOCOS - RELAÇÕES FUNCIONAIS ENTRE OS BLOCOS

Na Figura 4 mostra-se um diagrama geral dos blocos, que ilustra as relações funcionais entre eles.

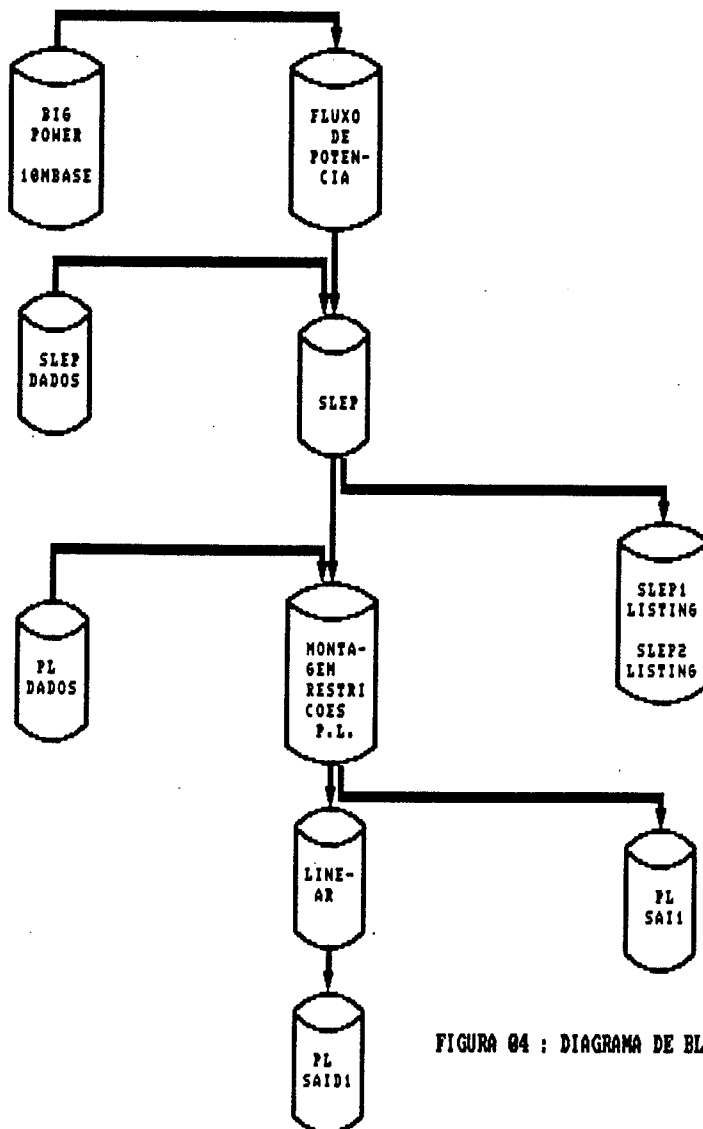


FIGURA 04 : DIAGRAMA DE BLOCOS.

5.5 SUGESTÕES PARA MELHORIA DO DESEMPENHO DO PROGRAMA COMPUTACIONAL

Para fazer uma análise do desempenho do programa computacional CIS., foram tomados alguns dos tempos de processamento, como mostrado abaixo:

Os tempos correspondem a uma iteração com um Sistema Elétrico

composto por uma rede de 45 barras, 72 linhas e 10 geradores.

DESCRIÇÃO DO PROCESSO	TEMPO (SEG)	COMENTÁRIOS
- Fluxo de Potência.....	50.5	Inclui leitura de dados da unidade de disco e escrita das saídas em disco
- SLEP (Com análise de sensibilidade).....	55.73	
- Montagem de Restr. P.L.....	0.95	
- Programação Linear.....	1.00	
- Levar um arquivo da unidade de disco para disco temporário.....	20.00	

Observa-se que os maiores tempos correspondem aos processos que tem a ver com transferências de arquivos entre dispositivos de memória do Computador e à rodada do Programa Slep com Análise de sensibilidade.

Sugere-se para a melhoria do desempenho do programa, as seguintes ações:

- 1- Juntar os programas num só pacote, evitando transferências desnecessárias de arquivos entre os diferentes dispositivos de memória do Computador.
- 2- Uma base de dados comum a todos os programas, pode ser adotada.
- 3- Implementar dentro do programa SLEP o cálculo recursivo das derivadas temporais de θ , como sugerido em 3.6.2., o qual, levará a uma diminuição no tempo de processamento.
- 4- Um Fluxo de Potência Desacoplado Rápido poderia ser facilmente implementado dentro do programa SLEP , aproveitando várias subrotinas desse programa, tais como:

- Ordenamento Tinney 2

- Montagem da matriz B linha em forma esparsa
- Construção da tabela LDU de uma matriz armazenada na forma esparsa
- Solução do sistema linear $A X = B$, por substituição direta e inversa.

5.6 CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS

Aspectos da implementação computacional do algoritmo proposto para solução do cálculo da C.I.S., foram mostrados neste capítulo.

Os programas já existentes que foram utilizados são os seguintes:

BIGPOWERMODE : De Fluxo de Potência.

SLEP : De análise de Estabilidade Transitória e Sensibilidade das Margens de Segurança.

LINEAR : De Programação Linear

Os programas desenvolvidos neste trabalho de Dissertação foram:

CIS : De Cálculo da Capacidade de Intercâmbio Simultâneo.

PL : De Montagem das restrições para otimização por Programação Linear.

Da análise dos tempos de procedimentos dentro do algoritmo, constatou-se que devido à transferência de arquivos entre dispositivos de memória do Computador o algoritmo torna-se pouco eficiente. Algumas sugestões para melhoria do desempenho foram feitas no final do capítulo.

CAPITULO 6

EXEMPLOS DE APLICAÇÃO DA METODOLOGIA E ANÁLISE DE RESULTADOS

6.1 INTRODUÇÃO

O algoritmo proposto foi testado para um Sistema Elétrico composto por 45 barras, 72 elementos (linhas ou transformadores) e 10 geradores e para o Sistema IEEE 118 barras, com 179 elementos e 20 geradores. No primeiro, foram definidas duas áreas de estudo e suas correspondentes linhas de interligação. No Sistema IEEE, foi considerada só uma área de estudo.

Para o Sistema de 45 barras , foi calculada a C.I.S. de importação para as duas áreas definidas, sendo considerados vários pontos de operação diferentes, observando-se assim, o desempenho do algoritmo para várias inicializações. Posteriormente, foi calculada a C.I.S. de Importação, mudando-se o tempo de abertura dos disjuntores após curto-circuito trifásico, de 9 para 6 ciclos. As tabelas dos resultados obtidos, são apresentadas neste capítulo, assim como análises dos resultados.

Para a área de estudo definida no Sistema IEEE 118 barras, foram calculadas as C.I.S.'s de importação e exportação, considerando dois despachos iniciais diferentes. Os resultados obtidos e as análises correspondentes são apresentados também neste capítulo.

6.2 SISTEMA DE 10 GERADORES

Um diagrama unifilar deste Sistema aparece na Figura 5 ressaltando-se

Os limites térmicos, assim como os limites físicos de geração das máquinas, encontram-se no Apêndice 2.

A primeira área, foi chamada CELESC e ficou definida pelas seguintes linhas de interligação com o restante do Sistema :

Linha : Farroupilha - Siderópolis 230 Kv

Linha : Curitiba - Joinville 230 Kv

Linha : Blumenau 520 Kv - Blumenau 230 Kv

Assim, as usinas de Jorge Lacerda A, B e C, pertencem à área CELESC.

A segunda área escolhida foi chamada CEEE e ficou definida pelas seguintes linhas de interligação com o restante do Sistema :

Linha : Siderópolis - Farroupilha 230 Kv

Linha : Barracão - Gravataí 520 Kv

Linha : Pinheiro - Venâncio Aires 520 Kv

Linha : Xanxere - Passo Fundo 230 Kv.

As usinas de Passo Fundo e Itaúba pertencem, então, à área CEEE.

6.2.1. Capacidade de Intercâmbio Simultâneo de Importação da Área CELESC

Inicialmente, foi fixado o tempo de abertura dos disjuntores em 9 ciclos para as contingências consideradas, as quais são apresentadas no Apêndice 2.

Dois despachos iniciais foram propostos e estão mostrados na Tabela

1.

TABELA 1 : Despachos iniciais

USINAS	Geração Caso 01	Geração Caso 02
Barracão	650,00	531,00
Passo Fundo	215,00	111,00
Salto Osso.	1050,00	867,00
Foz Areia	1110,00	1594,00
Salt. Santi.	1325,00	1400,00
J. Lacerda A	90,00	90,00
J. Lacerda B	120,00	120,00
J. Lacerda C	241,00	241,00
Segredo	1358,00	1358,00
Itaúba	490,00	337,00
Totais	6649,00	6649,00

Note-se que as usinas da Área CELESC foram despachadas no seu máximo valor. Isto foi feito para testar o desempenho do algoritmo a partir da condição mais distante do ponto de máxima importação da Área CELESC.

A barra Segredo neste caso foi considerada como barra de folga.

Os resultados obtidos com o programa computacional desenvolvido neste trabalho, são apresentados na Tabela 2. Na Tabela 3, são mostrados os fluxos de potência nas linhas de interligação da Área CELESC encontrados com o mesmo programa.

TABELA 2 : Resultados do cálculo da C.I.S.da área CELESC

USINAS	Geração Caso 01	Geração Caso 02
Barracão	700,00	700.00
Passo Fundo	260,00	260,00
Salto Osso.	792,00	794.00
Foz Areia	1510,00	1510,00
Salt. Santi.	1400,00	1400,00
J. Lacerda A	36,00	36,00
J. Lacerda B	48,00	48,00
J. Lacerda C	92,00	92,00
Segredo	1376,00	1375,00
Itaúba	440,00	441.00
C. I. S. Imp.	1092,58	1092.54
Margem Seg.	0.195	0.199
Cont. críti.	1 e 3	1 e 3
Iterações	6	7

Tabela 3 : Fluxos nas linhas de interligação da área CELESC

LINHA	CASO 01	CASO 02
Farroup-Sider.	99,42	99,45
Curitiba-Join.	288,42	288,38
Blum. 520-230	704,73	704,70

Como se observa na Tabela 2 os valores de despacho são praticamente iguais. Da mesma forma, o intercâmbio máximo conseguido de 1092 Mw.

A margem de segurança final foi de 0,19, maior do que zero.

Neste exemplo, o limite térmico foi alcançado primeiro e foi o determinante do máximo intercâmbio.

A penúltima linha da Tabela 2 indica as duas contingências mais críticas e a última linha o número de iterações necessário.

Esta Tabela explicita ainda o fato de, mesmo com inicializações diferentes, obtêm-se pontos de operação finais muito semelhantes.

Foi então mudado o tempo de abertura dos disjuntores de 9 para 6 ciclos e calculada a C.I.S. de importação da área CELESC, tomando como despacho inicial, o correspondente ao Caso 01.

Uma Tabela comparativa dos resultados com 9 e 6 ciclos é apresentada.
(Tabela 4)

TABELA 4 : C.I.S. com tempos de abertura de 9 e 6 ciclos

	USINAS	Geração 9 Ciclos	Geração 6 Ciclos
1	Barracão	700,00	700.00
2	Passo Fundo	260,00	260,00
3	Salto Osso.	792,00	791.00
4	Foz Areia	1510,00	1511,00
5	Salt.Santi.	1400,00	1400,00
6	J.Lacerda A	36,00	36,00
7	J.Lacerda B	48,00	48,00
8	J.Lacerda C	92,00	91,00
9	Segredo	1376,00	1374,00
10	Itaúba	440,00	441.00
11	C. I. S. Imp.	1092,58	1092.61
12	Margem Seg.	0,195	0,545
13	Cont.criti.	1 e 3	1 e 3
14	Tensão crít.	Joinv..88	Joinv..88

Como o fator limitante da Capacidade de Intercâmbio Simultâneo foi a capacidade estática de uma das linhas componentes do Sistema, segundo indicado no programa computacional, a Tabela 4 mostra o mesmo despacho para as duas situações de tempo de abertura de defeito. Porém, como o tempo de duração da falta é menor no caso de 6 ciclos, a margem de segurança dinâmica correspondente (linha 12 da Tabela 4) é 0,545, maior que 0,195 para 9 ciclos de tempo de abertura do defeito.

6.2.2. Capacidade de Intercâmbio Simultâneo de importação da área CEEE

Como no item anterior, aqui também são analisados os casos : Inicializações diferentes com o mesmo tempo de abertura de 9 ciclos e tempos de abertura diferentes dos disjuntores (9 e 6 ciclos) com a mesma inicialização.

Considerou-se inicialmente um tempo de abertura dos disjuntores de 9 ciclos.

Dois despachos iniciais foram considerados e estão mostrados na Tabela 5.

TABELA 5 : Despachos iniciais

USINAS	Geração Caso 01	Geração Caso 02
Barracão	650,00	600,00
Passo Fundo	215,00	200,00
Salto Osso.	1050,00	1170,00
Foz Areia	1110,00	1140,00
Salt. Santi.	1325,00	1300,00
J. Lacerda A	90,00	70,00
J. Lacerda B	120,00	80,00
J. Lacerda C	241,00	201,00
Segredo	1358,00	1358,00
Itaúba	490,00	530,00
Totais	6649,00	6649,00

A barra Segredo foi fixada como barra de folga.

Os despachos das usinas da Área CEEE, Passo Fundo e Itaúba, foram definidos inicialmente com valores de geração altos.

Nas Tabelas 6 e 7 são apresentados os resultados obtidos com o

programa computacional.

TABELA 6 : Resultados do cálculo da C.I.S.da Área CEEE

	USINAS	Geração Caso 01	Geração Caso 02	Geração Caso 03
1	Barracão	468,00	516,00	296,36
2	Passo Fundo	137,00	69,00	201,00
3	Salto Osso.	883,00	864,00	928,30
4	Foz Areia	1626,00	1617,00	1860,00
5	Salt. Santi.	1400,00	1400,00	1400,00
6	J.Lacerda A	90,00	90,00	90,00
7	J.Lacerda B	120,00	120,00	120,00
8	J.Lacerda C	241,00	241,00	241,00
9	Segredo	1355,00	1374,00	1392,42
10	Itaúba	322,00	368,00	145,33
11	C. I. S. Imp.	2183,769	2206,50	2300,88
12	Margem Seg.	0,127	0,1529	-1,117
13	Cont. críti.	11 e 1	1 e 11	1 e 14
14	Iterações	3	6	10

TABELA 7 : Fluxos pelas Linhas de Interligação da Área CEEE

LINHA	CASO 01	CASO 02
Sider-Farroup.	17,73	19,71
Xanx-Pass Fund	184,47	195,31
Barr. -Gravataí	1071,62	1087,82
Pinh. -V. Aires	900,93	903,65

As C. I. S.'s encontradas nos casos 01 e 02, tem uma variação de 23 Mw

entre si. A margem de segurança obtida também possui valores próximos e as contingências críticas aparecem em ordem diferente (11 e 1 , e, 1 e 11).

Nota-se que o fator limitante da Capacidade de Intercâmbio Simultâneo indicado pelo programa nestes casos, foi a Estabilidade Transitória.

Observa-se também que aqui a característica não linear do problema se manifesta de forma mais marcante. Para a obtenção de resultados mais precisos seriam necessárias linearizações com menores intervalos de variação de despacho.

A coluna 5 da Tabela 6 mostra os despachos obtidos pelo programa sem a consideração da estabilidade transitória. Como se vê, o intercâmbio máximo neste caso é maior que aquele obtido considerando restrições tanto estáticas quanto de estabilidade transitória.

Observa-se também, na linha 12 coluna 5 da Tabela 6, que a margem de segurança nesse caso é negativa e, portanto, para esse despacho o Sistema é instável.

Como observação adicional, vê-se nas Figuras 06 e 07, as curvas dos ângulos versus tempo para os casos correspondentes aos despachos das colunas 3 e 5 da Tabela 6.

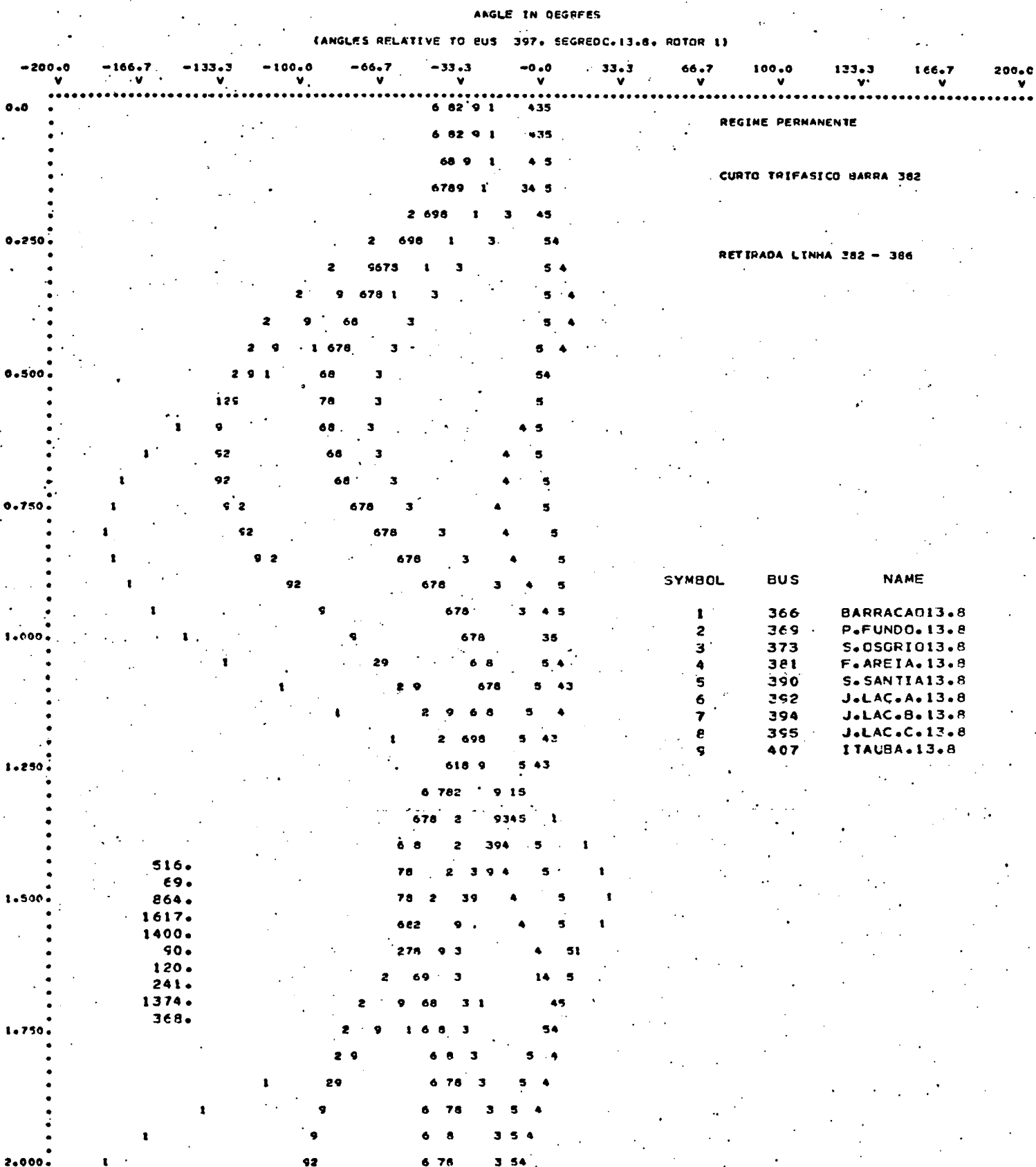


Figura 06 : Curvas de ângulos versus tempo correspondente ao despacho da
coluna 3 da Tabela 6.

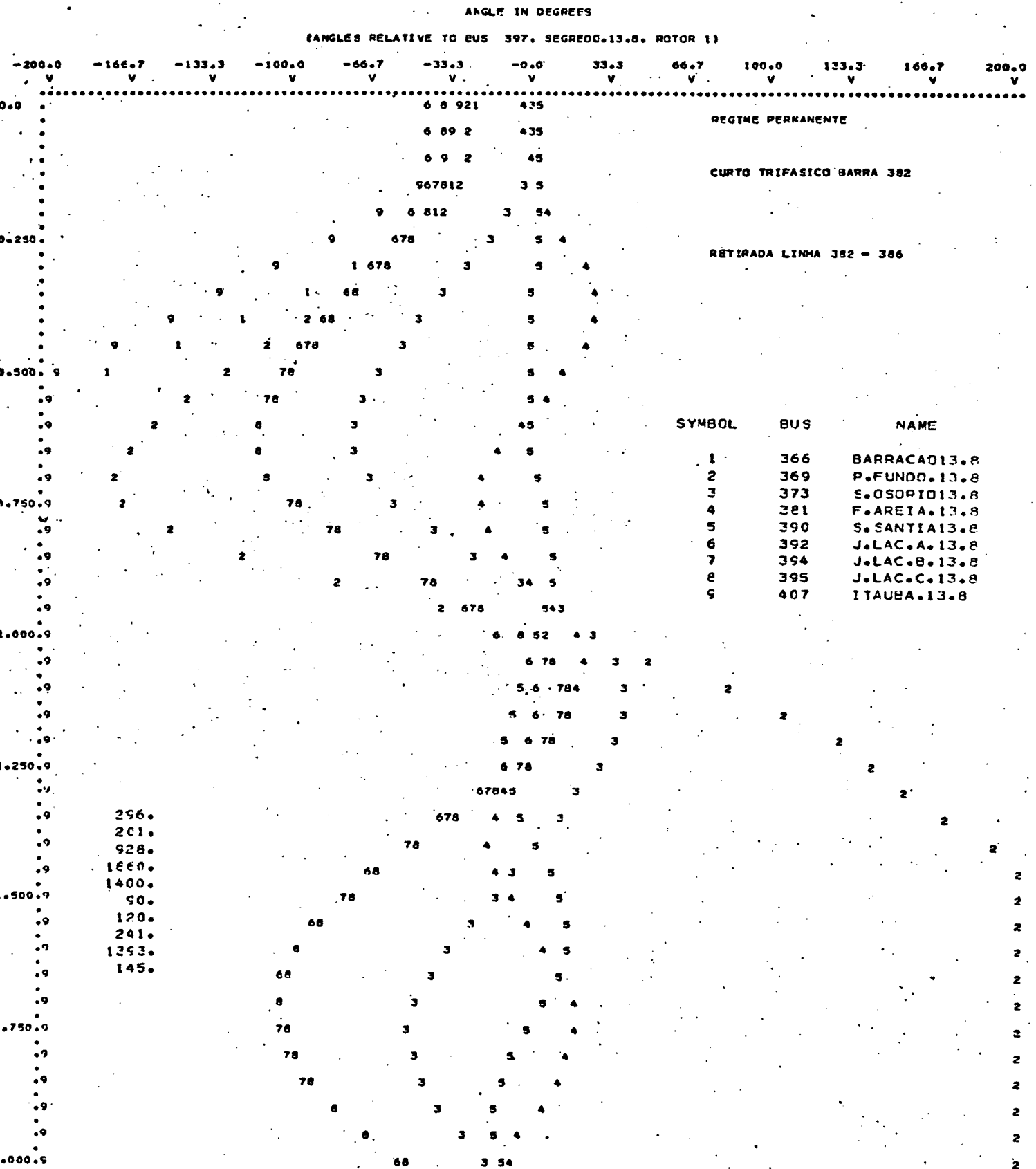


Figura 07 : Curvas de ângulos versus tempo correspondente ao despacho da
coluna 5 da Tabela 6

Observa-se na Figura 07 que, para a contingência 1, referente a curto trifásico na barra 382 com saída da linha 382-386, o Sistema apresenta instabilidade.

Uma tabela comparativa entre os resultados obtidos com tempos de abertura de 9 e 6 ciclos, é apresentada a seguir na Tabela 8.

TABELA 8 : C.I.S. com tempos de abertura de 9 e 6 ciclos

USINAS	Geração 9 ciclos	Geração 6 ciclos
Barracão	468,00	509,00
Passo Fundo	137,00	150,00
Salto Osso.	883,00	974,00
Foz Areia	1626,00	1550,00
Salt. Santi.	1400,00	1400,00
J. Lacerda A	90,00	90,00
J. Lacerda B	120,00	120,00
J. Lacerda C	241,00	241,00
Segredo	1355,00	1380,00
Itaúba	322,00	252,00
C. I. S. Imp.	2183,769	2244,51
Margem Seg.	0,127	0,314
Cont. críti.	11- 1	11 - 1
Tensão crít.	Joinv..92	Joinv..92

Observa-se na Tabela 8 que a C.I.S. de importação da área CEEE, aumenta de 61 MW com uma diminuição no tempo de abertura do defeito de 9 para 6 ciclos, enquanto que a margem de segurança dinâmica do Sistema muda de 0,127

para 0,314. Estes resultados corroboram a indicação do programa computacional de que neste caso a limitante da C.I.S. de importação na área CEEE, é a Estabilidade Transitória.

6.3 SISTEMA IEEE 118 BARRAS 20 GERADORES

Este Sistema está composto por 118 barras, 179 elementos (linhas e transformadores) e 34 máquinas, mas para o presente estudo só foram considerados 15 geradores e 5 motores. Um diagrama unifilar do Sistema é apresentado na Figura 08 e os dados do mesmo aparecem no Apêndice 3.

Os limites físicos das máquinas, assim como as contingências consideradas na análise transitória estão no Apêndice 4.

A área de estudo considerada ficou definida pelas seguintes linhas de interligação:

Linha : 24 - 70

Linha : 24 - 72

Linha : 33 - 37

Linha : 34 - 36

Linha : 34 - 37

Linha : 34 - 43

Linha : 38 - 37

Linha : 38 - 65

Os geradores das barras 10, 12, 25, 26 e 31 pertencem à área de estudo. Para efeitos de análise de estabilidade transitória, os motores síncronos das barras 4, 27, 40, 42, 90 e 112 foram levados em conta.

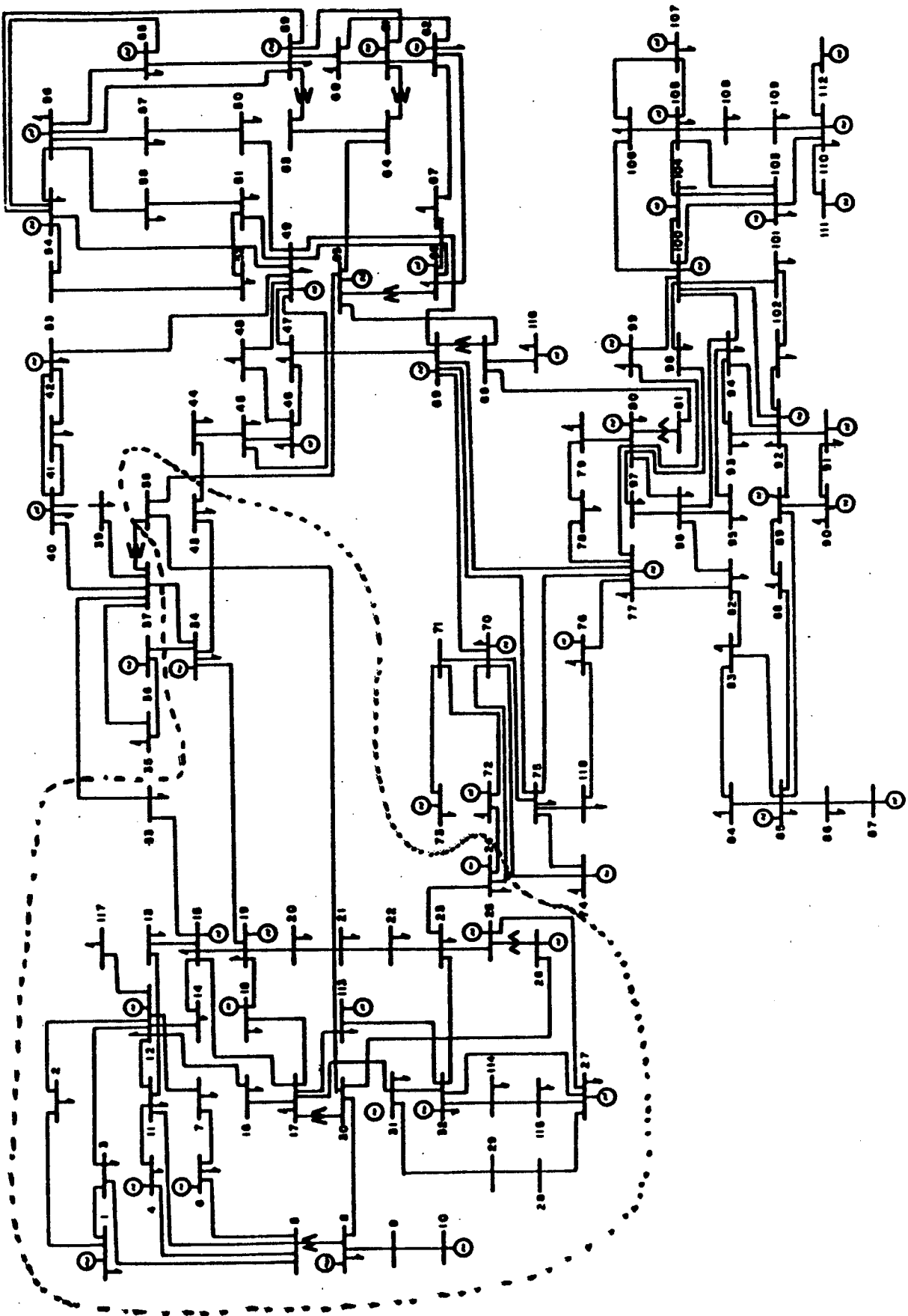


Figura 08 : Sistema IEEE 118 barras

6.3.1 Capacidade de Intercâmbio Simultâneo de importação da área de estudo

Os despachos iniciais propostos são mostrados na Tabela 9.

TABELA 9 : Despachos iniciais

	USINAS	Geração Caso 01	Geração Caso 02
1	Barra 10	450,00	400.00
2	Barra 12	85,00	85,00
3	Barra 25	220,00	172.00
4	Barra 26	314,00	300,00
5	Barra 31	7,00	7,00
6	Barra 49	204,00	204,00
7	Barra 59	155,00	155,00
8	Barra 61	160,00	174,00
9	Barra 65	391,00	391,00
10	Barra 66	392,00	392.00
11	Barra 69	523,00	530,00
12	Barra 80	477,00	477,00
13	Barra 89	607,00	650,00
14	Barra 100	252,00	300,00

A Barra 69 foi considerada como barra de folga.

Na Tabela 10 são apresentados os resultados obtidos com o programa CIS, calculando a Capacidade de Intercâmbio de importação da área em estudo.

TABELA 10 : C.I.S de importação da área em estudo

	USINA	Geração Caso 01	Geração Caso 02
1	Barra 10	147,60	147,60
2	Barra 12	100,00	100,00
3	Barra 25	250,00	250,00
4	Barra 26	297,40	307,40
5	Barra 31	7,00	7,00
6	Barra 49	250,00	250,00
7	Barra 59	200,00	200,00
8	Barra 61	200,00	200,00
9	Barra 65	400,00	400,00
10	Barra 66	400,00	400,00
11	Barra 69	557,47	546,32
12	Barra 80	500,00	500,00
13	Barra 89	650,00	650,00
14	Barra 100	300,00	300,00
15	C. I. S. Imp	306,25	297,20
16	Margem Seg	0,779	0,757
17	Cont. Crt.	2 e 21	2 e 21
18	Iterações	9	9

Os despachos obtidos com o programa computacional, não apresentam diferenças apreciáveis. O valor de C.I.S. de importação obtido apresentou uma variação de 9 MW, os quais correspondem à diferença de perdas entre um despacho e o outro. Esta diferença é suprida pela barra de folga e pode-se considerar como um incremento fictício de Intercâmbio. A margem de segurança dinâmica obtida foi praticamente igual (0,77 e 0,75).

Foi constatado com o programa computacional, que o fator determinante da C.I.S. de importação para este caso, correspondeu as limitações físicas de geração das Usinas.

6.3.2 Capacidade de Intercâmbio Simultâneo de exportação da área em estudo

Os mesmos despachos iniciais usados no caso anterior, foram adotados.

Na Tabela 11 são apresentados os resultados obtidos com o programa C.I.S.

TABELA 11 : C.I.S de exportação da área em estudo

	USINA	Geração Caso 01	Geração Caso 02	Geração Caso 03	Geração Caso 04
1	Barra 10	462,69	450,00	650,00	515,00
2	Barra 12	100,00	100,00	100,00	95,00
3	Barra 25	250,00	250,00	208,00	235,00
4	Barra 26	350,00	350,00	350,00	350,00
5	Barra 31	7,00	7,00	7,00	7,00
6	Barra 49	178,31	191,00	4,00	179,00
7	Barra 59	155,00	167,00	200,00	135,00
8	Barra 61	160,00	164,00	200,00	140,00
9	Barra 65	311,00	251,00	137,00	351,00
10	Barra 66	312,00	326,00	400,00	352,00
11	Barra 69	527,69	532,00	548,00	518,00
12	Barra 80	477,00	500,00	500,00	427,00
13	Barra 89	650,00	650,00	650,00	650,00
14	Barra 100	300,00	300,00	300,00	279,00
15	C. I. S. Imp	51,38	40,28	182,32	81,81
16	Margem Seg	0,423	0,484	-114,32	-0,157
17	Cont. Crt.	5 e 2	5 e 2	5 e 9	5 e 2
18	Iterações	3	5	10	7

As C.I.S. calculadas para os casos 01 e 02, apresentam uma diferença de 9 Mw entre si. A margem de segurança obtida nos dois casos apresenta valores parecidos. As contingências críticas foram as mesmas.

O fator limitante do intercâmbio nestes dois casos foi a Estabilidade Transitória. Observou-se, grande sensibilidade da margem de segurança em relação à geração da usina correspondente à barra 10.

Na coluna 5 da Tabela 11, é apresentado o Despacho obtido rodando o Programa CIS sem considerar restrições de Estabilidade Transitória. Para esse caso (chamado caso 03), foi observado um aumento da C.I.S. de exportação de 51Mw para 182,32Mw, no entanto, a margem de segurança se tornou negativa. Na Figura 09 apresentam-se as curvas dos ângulos versus o tempo para o Despacho correspondente a este caso 03, onde pode ser observada instabilidade logo após curto trifásico na barra 08 e retirada da linha 08-30, contingência indicada pelo programa SLEP como a mais crítica.

Na coluna 6 da Tabela 11, é mostrado o Despacho correspondente a uma iteração intermediária do cálculo da C.I.S. sem considerar restrições de Estabilidade Transitória. Este caso, chamado de caso 04, mostra para um valor de intercâmbio de 81,81 Mw(30 MW a mais que nos casos 01 e 02) uma margem de segurança negativa. A Figura 10 contém as curvas dos ângulos versus tempo correspondentes à simulação da contingência 5 (curto na barra 08 com saída da linha 08-30). Na figura, observa-se instabilidade ante esse defeito, sendo portanto o Sistema, instável nesse ponto de operação. Na Figura 11 mostra-se as curvas correspondentes ao despacho do caso 01 com simulação da mesma contingência 5.

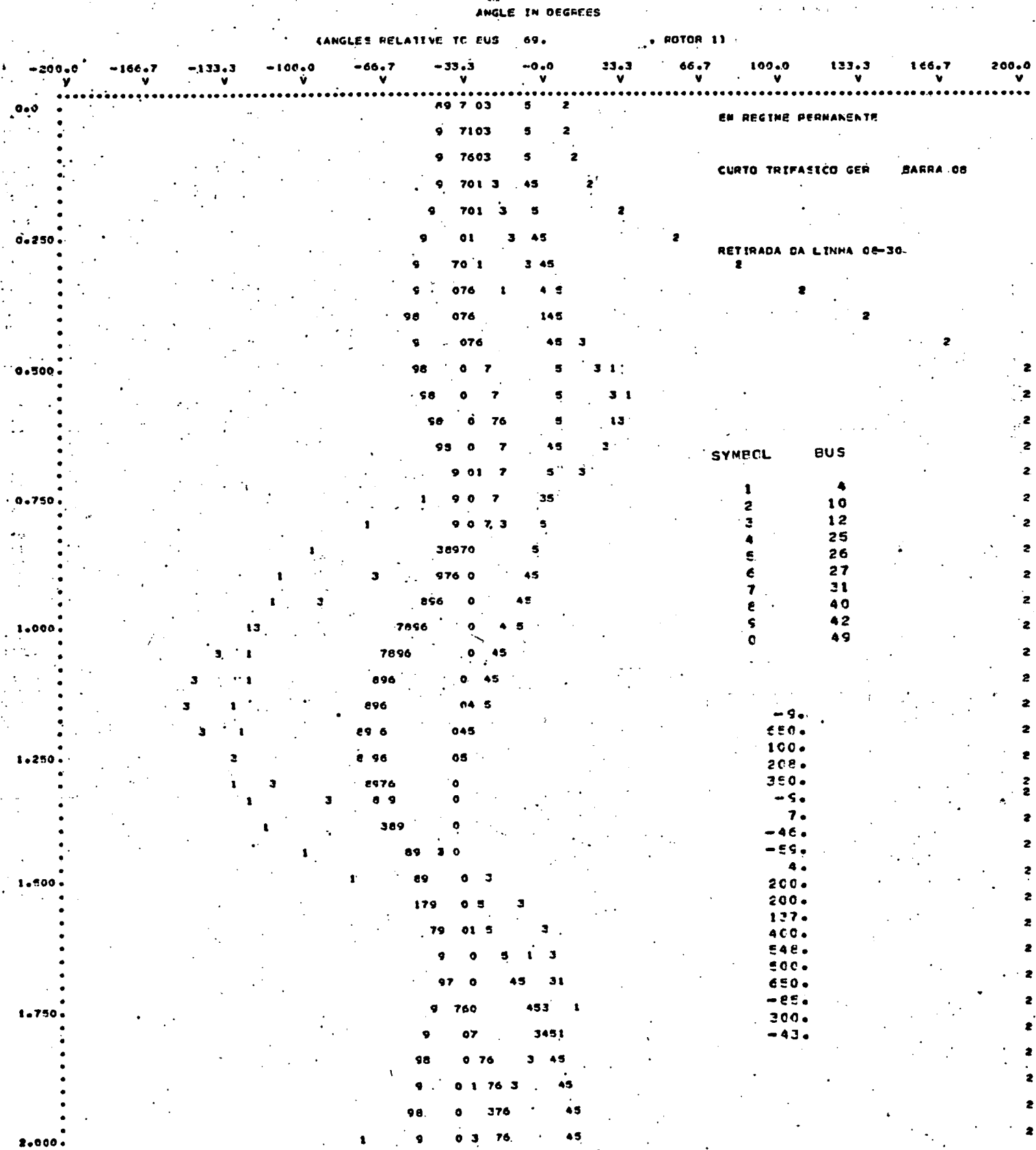


Figura 09 : Curvas de ângulos versus tempo correspondentes ao caso 03 com intercâmbio de exportação de 182,32 Mw.

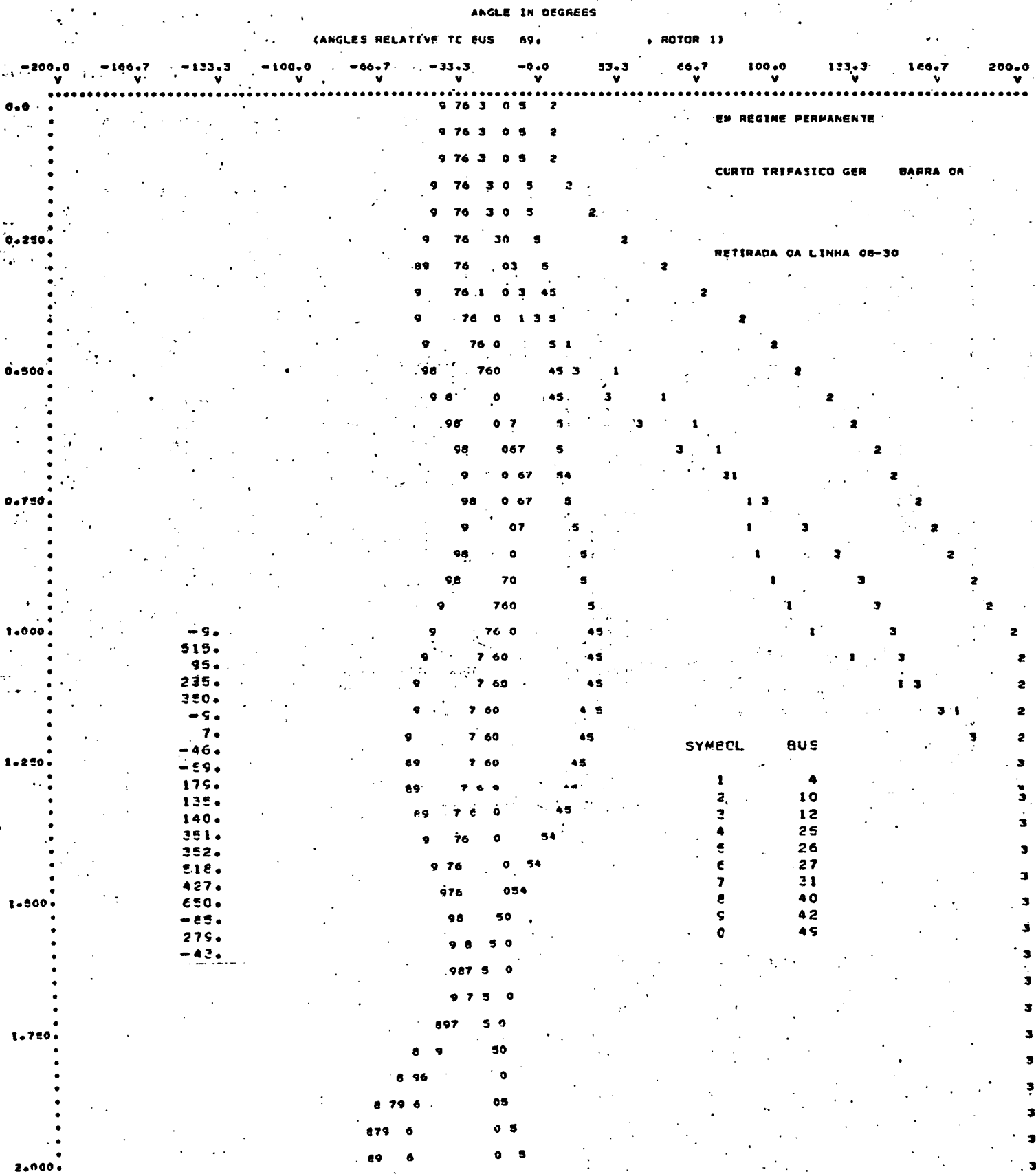


Figura 10 : Curvas de ângulos versus tempo correspondentes ao caso 04 com intercâmbio de exportação de 81,81 Mw.

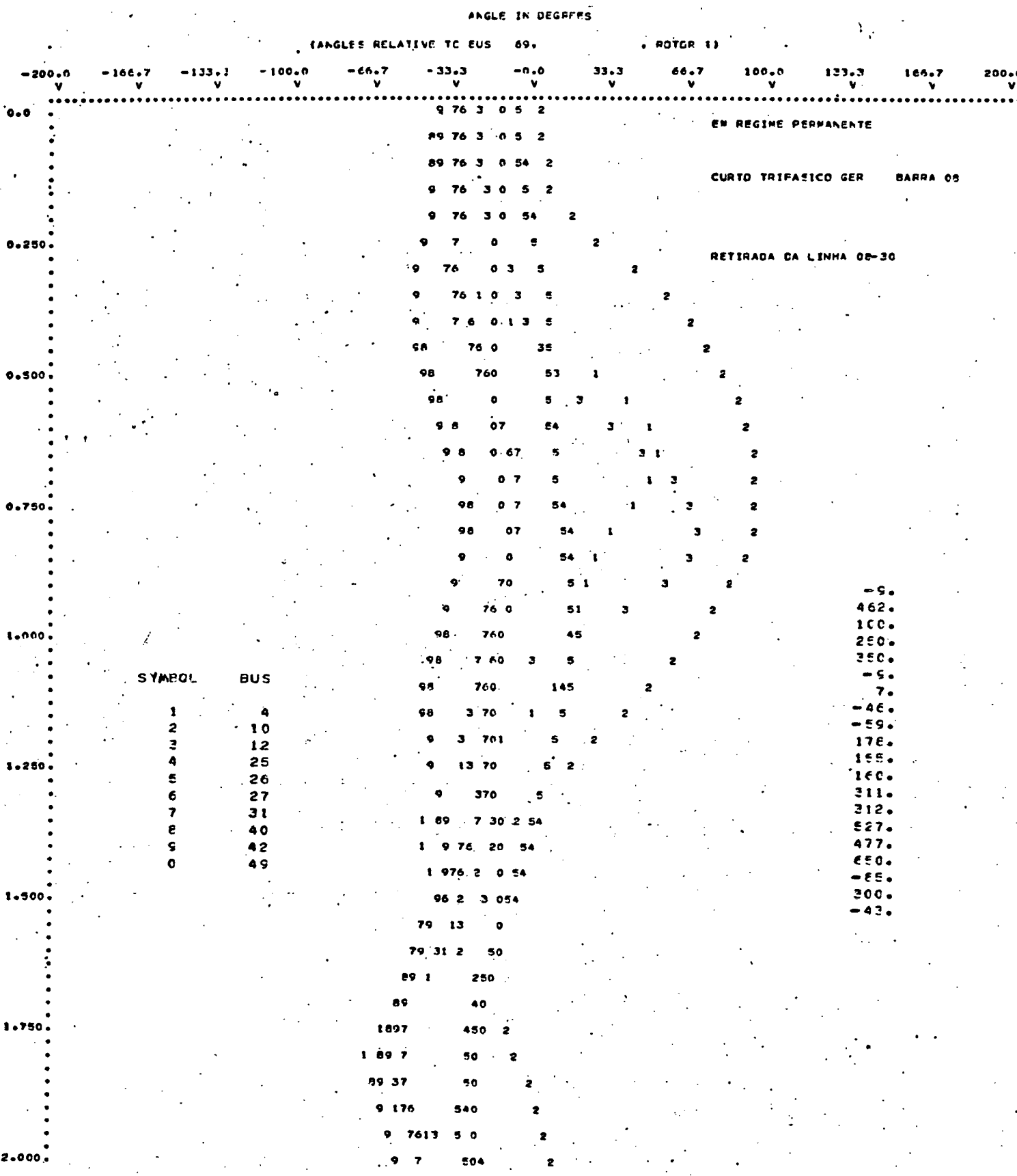


Figura 11 : Curvas de ângulos versus tempo correspondentes ao caso 01 com intercâmbio de exportação de 51,38 Mw.

6.4 EVOLUÇÃO DO INTERCÂMBIO, MARGEM DE SEGURANÇA E PERDAS NO PROCESSO ITERATIVO

Os valores de Perdas, Intercâmbio e Margem de Segurança do Sistema, foram monitorados , iteração por iteração, no estudo do cálculo da C.I.S. da Área CEEE. Na Tabela 12 é apresentada essa evolução para uma iteração típica do programa.

TABELA 12: Evolução das perdas e do Intercâmbio

Iteração	0	1	2	3	4	5	6
Perdas	202,3	189,6	178,8	176,4	175,9	185,2	178,5
Intercâmbio	1913,	1995,	2076,	2158,	2191,	2236,	2206,
Marg. Seg.	-7.35	-2.37	-0.60	0.14	0.23	-0.15	0,152

Na iteração 5 o algoritmo atinge um ponto no qual não foi possível o aumento de Intercâmbio, além disso, a Margem de Segurança do Sistema nesse ponto era negativa. Neste caso o programa faz um Redespacho de Segurança, diminuindo o Intercâmbio até uma quantidade especificada externamente, para conseguir uma Margem de Segurança positiva (0.1529 no caso).

Observa-se também que as perdas no Sistema sempre diminuem quando aumenta a segurança dinâmica e aumentam quando diminui a segurança. Este fato tem sido observado nos casos simulados e é objeto de estudo em outras dissertações de Mestrado na UFSC atualmente.

6.5 INICIALIZAÇÃO DO PROCEDIMENTO

O algoritmo computacional desenvolvido, apresentou convergência nos casos rodados. O número de iterações depende, fixados os intervalos de variação de despacho para linearização, do ponto de operação inicial.

Visando uma boa escolha deste ponto, propõe-se a seguinte estratégia de inicialização, testada com sucesso em vários casos simulados:

A partir de um ponto inicial que satisfaça a equação de balanço de potência, efetua-se uma primeira iteração, na qual, não são consideradas restrições de Estabilidade Transitória e os acréscimos de potência mecânica são limitados ao 50% do valor nominal. Além disso, os limites de fluxo pelos elementos do Sistema são definidos como sendo o 95% dos limites térmicos .

6.6 CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS

Em função dos resultados apresentados, nada se pode concluir sobre a dominância das restrições de Estabilidade Transitória, ou, o contrário. Foram mostrados exemplos onde acontece uma, ou, outra possibilidade. O que pode-se afirmar, é que um método rigoroso de cálculo da Capacidade de Intercâmbio Simultâneo, deve levar em conta tanto as restrições estáticas, quanto as restrições de Estabilidade Transitória.

Foi também observado nos casos estudados, que, quando é procurada C.I.S. de uma Área, as perdas do Sistema aumentam a partir de certo valor do Intercâmbio (ver Tabela 12)

CAPÍTULO 7

CONCLUSÕES GERAIS E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

7.1 CONCLUSÕES SOBRE O PRESENTE TRABALHO DE DISSERTAÇÃO

O problema de Cálculo da Capacidade de Intercâmbio Simultâneo (C.I.S.), foi abordado no presente trabalho, dentro do contexto do Planejamento da Operação de Sistemas Hidro-Térmicos.

Uma nova definição de C.I.S. foi adotada com o objeto de incluir, além das restrições estáticas da rede, restrições de Estabilidade Transitória.

No capítulo 3, foram apresentados os modelos utilizados neste trabalho, entre os quais podem-se destacar:

- Modelo linearizado da rede
- Modelo dinâmico do centro de ângulo
- Método iterativo SLEP, de análise de Estabilidade Transitória
- Análise de sensibilidade das Margens de Segurança Dinâmica

Descritos os modelos, foi então apresentada a formulação matemática do cálculo da C.I.S. de uma área componente de um Sistema Interligado.

A formulação vista, permitiu abordar diversos problemas de interesse em operação de Sistemas Interligados, tanto para Sistemas que operam em modo autônomo, quanto para Sistemas que pertencem a um Sistema Interligado que opera com critérios globais de otimização. Destacou-se que, quando são definidas as linhas de interligação de um Sistema, o Sistema Interligado está

sendo implicitamente dividido em duas áreas : Uma de Exportação e outra de Importação.

No capítulo 4, foi proposto um algoritmo para a solução do problema de cálculo da C.I.S. de uma área. As características mais relevantes dele são:

- A C.I.S. de uma área do Sistema Interligado é obtida mediante um processo iterativo.
- São incluídas, além das restrições estáticas de fluxos de potência ativa e limites físicos das máquinas, restrições de Estabilidade Transitória, através do método iterativo SLEP e análise de sensibilidade.
- O algoritmo de solução é automático. A partir de um despacho inicial, é calculada a C.I.S. de uma área.
- Em cada uma das iterações é otimizado o incremento de intercâmbio, após serem linearizadas as restrições do problema. O incremento de intercâmbio, é expresso como a soma dos incrementos de fluxos de potência ativa pelas linhas de interligação da área. O método de otimização utilizado, foi Programação Linear.

Dentro do algoritmo proposto foram incluídos: Um Redespacho de Segurança e uma Função de Correção da Segurança Dinâmica.

No capítulo 5, foram discutidos os aspectos computacionais da implementação do algoritmo proposto. Alguns programas já desenvolvidos e disponíveis no Departamento de Engenharia Elétrica da UFSC, foram utilizados. Tais programas foram:

- Fluxo de Potência BIGPOWERMODE.
- Análise de Estabilidade Transitória SLEP, e Análise das Margens de Segurança Dinâmica.

- Programa LINEAR, de solução de Programação Linear pelo método Simplex Dual.

Os programas desenvolvidos neste trabalho foram:

- PL : Programa que monta a tabela de restrições para Programação Linear, e calcula a Função Objetivo a ser otimizada.
- CIS: Programa que contém o algoritmo do Cálculo da Capacidade de Intercâmbio Simultâneo de uma área.

Este último programa, foi desenvolvido em REXX, a qual é uma Linguagem computacional de alto nível, para Equipamentos IBM.

Os resultados de alguns dos testes realizados, são apresentados no capítulo 6.

Foi observado, que as perdas do Sistema começam a crescer, a partir de um certo valor de Intercâmbio.

O desempenho da Função de Correção de Segurança, foi adequado. Foi visto como a Margem de Segurança do Sistema, foi sendo corrigida gradativamente, de iteração em iteração, de acordo com os valores de Margem Alvo definidos com a Função de Correção.

Os exemplos apresentados mostraram casos onde o valor máximo do intercâmbio aconteceu devido a:

- a- Limitação de capacidade dos elementos do Sistema.
- b- Limite de geração das usinas atingido.
- c- Estabilidade Transitória

Os limites obtidos foram simulados com o programa TRANSDIR e as previsões foram confirmadas.

No caso do Sistema IEEE-118, a solução de máximo intercâmbio, em um

dos exemplos, ocorreu devido à Estabilidade Transitória, para um valor de intercâmbio de 51 MW. Liberada a restrição de Estabilidade Transitória, obteve-se um intercâmbio de 181 MW que, na simulação com TRANSDIR, apresentou instabilidade. Repetida a simulação para um despacho correspondente a uma iteração intermediária com um intercâmbio de 81 MW, observou-se também instabilidade.

As principais conclusões que foram tiradas da análise dos resultados foram as seguintes :

- Houve convergência nos casos estudados, independentemente do ponto inicial considerado.
- O tempo computacional empregado, depende da escolha do ponto inicial.
Levando em conta isso, foi proposta e testada uma estratégia para inicialização do problema.
- Apesar da importância do exposto acima em relação à Estabilidade Transitória, não se deve concluir sobre se as restrições estáticas dominam as restrições de Estabilidade Transitória, ou, o contrário. Nos exemplos mostrados acontece uma ou outra possibilidade. Portanto, só se pode afirmar com certeza é que um método rigoroso de cálculo da C.I.S., deve levar em conta tanto as restrições estáticas quanto as restrições de Estabilidade Transitória.

7.2. SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

7.2.1. Inclusão das restrições estáticas de tensão

Um modelo mais completo de solução do problema do cálculo da C.I.S., deve conter as restrições de tensão nas barras do Sistema. Para contornar esse

problema bastaria se calcular as sensibilidades das tensões em relação às potências mecânicas, que são as variáveis de decisão na formulação adotada.

Uma maneira de calcular tais sensibilidades é apresentada na referência [20]

7.2.2. Uso de Técnicas especiais para a solução com Programação Linear

Tem sido feitas muitas pesquisas na área de Aplicações da Programação Linear em Análise de Segurança Estática de redes: [6], [20], [21], entre outras.

Uma vez que as restrições de Estabilidade Transitória foram expressas como sensibilidades em relação aos acréscimos de potência mecânica, estas restrições podem ser facilmente incluídas em modelos que usem Programação Linear como técnica de otimização, podendo-se portanto aproveitar os avanços obtidos na área de Aplicações da P.L. , para resolver o problema de cálculo da C.I.S. de forma mais eficiente.

7.2.3 Algoritmos para Inicialização do Problema

Dada a dependência da metodologia proposta, em relação ao ponto inicial, pesquisas para achar Algoritmos de Inicialização do Problema poderiam ser feitas, visando diminuir o tempo de processamento total no cálculo da C.I.S..

7.2.4. Análise de Segurança

A análise de sensibilidade das Margens de Segurança [9] utilizada neste trabalho, dá a possibilidade de incluir na Análise de Segurança do Sistema, feita tradicionalmente sobre a ótica de restrições estáticas, a Análise de

Estabilidade Transitória. Este fato abre uma nova linha onde podem ser feitas várias pesquisas de interesse para operação de Sistemas de Potência.

7.2.5 Utilização da direção S

A direção S como definida em [8], tem sido usada com sucesso para correção da segurança dinâmica via redespacho. Pode-se estudar a possibilidade de incluir a utilização da direção S dentro do algoritmo de cálculo da Capacidade de Intercâmbio Simultâneo.

REFERÊNCIAS

- [1] - LANDGREN, G.L. and ANDERSON, S.W. - "Simultaneous Power Interchange Capability Analysis" - IEEE - Trans. on Power Apparatus and Systems PAS 6(92) - pg. 1973 a 1985 - Nov/Dez 1973.
- [2] - DA COSTA SILVA, A.A. - "Otimização do fluxo de Intercâmbio em Sistemas Interligados" - Trabalho de Dissertação de Mestrado UFSC-1976.
- [3] - DUNLOP, R.D. , GUTMAN, R. and MARCHENKO, P.P. - "Analytical Development of Loadability Characteristics for EHV and UHV Transmission Lines" - IEEE - Trans. on Power Apparatus and Systems PAS-98 - pg. 606 a 617 - 1979.
- [4] - SAUER, P.W. , DEMAREE, K.D. and PAI, M.A. - "Stability Limited Load Supply and Interchange Capability" - IEEE - Trans. on Power Apparatus and Systems PAS-102 - pg. 3637 a 3643 - 1983.
- [5] - FONSECA, L.G.S. , DECKER, I.C. e PEDROSO, A.S. - "Métodos de Análise de Estabilidade Transitória - Estudo Comparativo" - Artigo apresentado para o Oitavo Congresso Brasileiro de Automática - Belem do Pará - Setembro de 1990.
- [6] - STOTT, B. , MARINHO, J.L. - "Linear Programming For Power-System Network Security Applications" - IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems - PAS-98 - pg 837-844 - May/June 1979.

- [7] - FONSECA, L.G.S., MINUSSI, C.R. - "'Correção De Segurança De Sistemas De Energia Elétrica Considerando Falhas Tipo Curto-Circuito" - Artigo apresentado para o VIII Congresso Chileno de Ingeniería- Chile - 1989.

- [8] - FONSECA, L.G.S., PEDROSO, A.S. - "Correção De Segurança Dinâmica Em Sistemas De Potência De Grande Porte Via Redespacho" - Artigo aceito para o Oitavo Congresso Brasileiro de Automática - Belem do Pará - Setembro de 1990.

- [9] - FONSECA, L.G.S., MINUSSI, C.R. - "Redespacho De Geração Para Controle De Segurança Dinâmica Em Sistemas De Energia Elétrica Através De Análise De Sensibilidade" - Artigo aceito para o Oitavo Congresso Brasileiro de Automática - Belem do Pará - Setembro de 1990.

- [10]- TERCER SEMINARIO DEL PLANEAMIENTO OPERATIVO EN EL SECTOR ELECTRICO NACIONAL - Noviembre 1985 - Interconexion Electrica S.A. Medellin - Colombia

- [11]- PEREIRA, M.V.F., PINTO, L.M.V.G. - "A Decomposition Approach To The Economic Dispatch Of Hydrothermal Systems" - IEEE. Trans. on Power Apparatus and Systems PAS 101 - pg 3851 a 3860 - October 1982.

- [12]- TÁVORA, C.J. , SMITH, O.J.M. - "Characterization Of Equilibrium And Stability In Power Systems" - IEEE. Trans. on Power Apparatus and Systems PAS 91 Número 3 - pg 1127 a 1130 - May/June 1972.

- [13]- ATHAY, T. , SHERKET. V.R. , PODMORE, R. , VIRMANI, S. , PUECH, C. - "Transient Energy Stability Analysis" - Conference on System Engineering For Power - Davos - Switzerland - 1979.

- [14]- FONSECA, L.G.S. , DECKER, I.C. - "Iterative Algorithm For Critical Energy Determination In Transient Stability Of Power System" - IFAC - Symp. Planning and Operation In Electric Energy Systems - Rio de Janeiro - Brazil - 483-489 - 1985.
- [15]- GLESS, G.E. - "Direct Method Of Liapunov Applied To Transient Power Systems Stability" - IEEE. Trans on Power Apparatus And Systems - Vol PAS 85 - pg. 159-168 - Feb 1966.
- [16]- EL-ABIAD, A.H. , NAGAPPAN, K. - "Transient Stability Regions of Multimachine Power Systems" - IEEE. Trans. on Power Apparatus and Systems - Vol PAS 85 - pg 169-179 - Feb 1966.
- [17]- FONSECA, L.G.S. - "Determinação de Domínios de Estabilidade para uso em Planejamento e Operação de Sistemas de Potência" - Tese de D.Sc. COPPE UFRJ - Rio de Janeiro - 1976.
- [18]- MICHEL, A.M. , FOUAD, A.A. , VITAL. V. - "Power Systems Transient Stability Using Individual Machine Energy Functions" - IEEE. Trans. CAS - Vol 30 Número 5 - 1983.
- [19] FOUAD, A.A. , STANTON, S.E. - "Transient Stability Analysis a Multimachine Power Systems. Part I : Investigation of System Trayectory, and Part II : Critical Transient Energy" - IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems - Vol PAS 100 - pg 3408-3424 - 1981.
- [20]- KIRSCHEN, D.S. , VAN MEETEREN, H.P. - "Mw/Voltage Control in a Linear Based Optimal Power Flow" - IEEE Trans. on Power Systems- Vol 3 - Número 2 - pg 481-489 - May 1988.
- [21]- MELIOPOULOS, A.P.S. , CONTAXIS, G. , KOVACS, R.R. , REPPEN, N.D. , BALU,

N. - "Power System Remedial Action Methodology" - IEEE trans. on Power Systems - Vol 3 - Número 2 - pg 500-509 - May 1988.

- [22]- RIBBENS-PABELLA, M. , GRUJIC, T. , SABATEL , BOUFFIOUX, A. - "Direct Methods for Stability Analysis of Large Scale Power Systems" - Proc. IFAC Symposium on Computer Application in Large Scale Power Systems - New Delhi - India - Pergamon Press - U.K.
- [23]- XUE, Y. , VAN CUTSEM, Th ., RIBBENS-PAVELLA, M. - "A Simple Direct Method for Fast Transient Stability Assesment of Large Power Systems" - 87 WM 104-3 IEEE/PES Winter Meeting - N.Orleans - 1987.
- [24]- KAKIMOTO, N. , HAYASHI, M. - "Transient Stability Analysis of Multimachine Power Systems by Liapunov's Direct Method" - IEEE Conference on Decision and Control - -464-470 - 1981.
- [25]- PAI, M. A. - "POWER SYSTEM STABILITY" Analysis by Direct Method of Liapunov - Vol 3- North Holland Publishing Company - 1981.
- [26]- DECKER, I.C. - "Análise de Estabilidade Transitória em Sistemas de Potência Usando o Conceito de Superfície Limite de Energia Potencial" - Tese de Mestrado - EEL - UFSC - Florianópolis - 1984.
- [27]- MINUSSI, C.R. Manuscrito da Tese de Doutorado a ser apresentada ao Colegiado do Curso de Pós-Graduação de Engenharia Elétrica da UFSC - Julho de 1990.

APÊNDICE 1

DADOS DO SISTEMA TESTE DE 10 GERADORES

ELEMENTO	BARRA	A BARRA	R	X	SHUNT
1	343	344	0.070	1.450	166.100
2	343	344	0.070	1.450	166.100
3	343	382	0.180	2.270	227.210
4	343	391	0.140	2.040	244.750
5	344	431	0.0	0.630	0.0
6	366	386	0.0	1.360	0.0
7	367	368	3.860	19.850	34.000
8	367	396	0.960	4.910	8.420
9	367	437	0.330	1.670	28.590
10	368	370	4.630	23.780	40.840
11	368	370	4.630	23.780	40.840
12	368	399	1.770	9.100	15.850
13	368	399	1.770	9.100	15.850
14	368	399	1.770	9.100	15.850
15	369	370	0.0	4.600	0.0
16	370	371	1.630	8.350	14.400
17	370	371	1.630	8.350	14.400
18	370	408	2.500	15.480	46.900
19	371	372	1.630	8.350	14.400
20	371	374	3.160	16.210	27.840
21	372	374	1.530	8.610	13.440
22	373	374	0.0	1.140	0.0
23	374	375	3.060	15.230	27.020
24	374	433	3.440	17.600	30.400
25	374	433	3.440	17.600	30.400
26	375	376	2.450	12.560	20.410
27	375	382	0.0	3.000	0.0
28	376	377	0.880	4.150	52.110
29	377	378	1.820	9.350	15.950
30	377	378	1.820	9.350	15.950

31	377	383	0.0	0.620	0.0
32	378	379	1.540	7.760	13.500
33	378	379	1.540	7.760	13.500
34	379	380	2.160	11.050	18.630
35	379	380	2.160	11.050	18.630
36	379	385	0.0	0.620	0.0
37	380	396	1.800	9.200	15.530
38	380	396	1.800	9.200	15.530
39	381	382	0.0	0.670	0.0
40	382	383	0.190	2.800	335.760
41	382	384	0.190	2.740	328.670
42	382	386	0.140	1.950	239.680
43	382	398	0.050	0.700	83.920
44	383	384	0.050	0.690	82.160
45	383	385	0.120	1.750	209.700
46	386	387	0.210	3.090	371.830
47	387	402	0.0	0.620	0.0
48	388	389	0.220	3.000	383.000
49	388	414	0.0	0.620	0.0
50	389	391	0.140	1.950	239.700
51	390	391	0.0	1.140	0.0
52	391	398	0.050	0.700	83.920
53	392	393	0.0	8.710	0.0
54	393	396	0.0	5.900	0.0
55	394	396	0.0	7.010	0.0
56	395	396	0.0	4.500	0.0
57	396	437	1.290	6.570	11.280
58	397	398	0.0	0.680	0.0
59	399	402	0.220	1.110	2.320
60	399	402	0.220	1.110	2.320
61	399	402	0.190	1.010	2.040
62	399	414	2.070	9.330	17.180
63	399	414	1.680	9.300	17.200
64	399	414	1.760	9.840	17.980
65	407	408	0.0	2.360	0.0
66	408	414	2.020	11.290	20.620
67	430	431	1.250	6.410	11.090
68	430	431	0.890	4.610	7.960

69	430	432	1. 100	11. 840	20. 270
70	430	433	2. 290	11. 740	20. 270
71	431	432	1. 720	8. 840	14. 340
72	431	432	1. 720	8. 840	14. 340
73	432	433	1. 810	9. 290	16. 070

APÊNDICE 2

DADOS DE LIMITES FISICOS DAS MAQUINAS E TERMICOS PELOS ELEMENTOS DO SISTEMA

1- LIMITES FISICOS DAS MAQUINAS (P.U.)

MINIMO	MAXIMO	NOMINAL
0.00	7.0000	7.0000
0.00	2.6000	2.6000
0.00	11.7600	11.7600
0.00	18.6000	18.6000
0.00	14.0000	14.0000
0.00	0.9000	0.9000
0.00	1.2000	1.2000
0.00	2.4100	2.4100
0.00	13.5800	13.5800
0.00	5.5600	5.5600

2- LIMITES TERMICOS

ELEMENTO	LIMITE (P.U.)
01 02	14.730
01 19	14.730
01 28	14.730
02 42	7.200
03 23	7.000
04 05	1.570
04 33	2.040
04 45	2.040
05 07	2.940
05 36	4.410
06 07	2.600
07 08	3.560
07 39	1.590

08	09	2.480
08	11	1.884
09	11	2.480
10	11	11.760
11	12	1.884
11	44	3.140
12	13	2.480
12	19	6.000
13	14	2.480
14	15	3.400
14	20	12.000
15	16	3.600
16	17	2.640
16	22	12.000
17	33	2.640
18	19	18.600
19	20	11.000
19	21	11.000
19	23	14.730
19	35	14.730
20	21	11.000
20	22	11.000
23	24	14.730
24	37	12.000
25	26	14.730
25	40	12.000
26	28	14.730
27	28	14.000
28	35	11.000
29	30	0.900
30	33	0.900
31	33	1.200
32	33	2.410
33	45	2.040
34	35	14.000
36	37	4.770
36	40	4.770
38	39	5.560

39	40	1.590
41	42	2.690
41	43	1.900
41	44	3.800
42	43	2.690
43	44	1.900

APÊNDICE 3

DADOS DO SISTEMA IEEE 118

ELEMENTO	BARRA	BARRA	R	X	SHUNT	LIMITE TÉRMICO
1	1	2	3.030	9.990	2.540	1.44
2	1	3	1.290	4.240	1.080	1.44
3	2	12	1.870	6.160	1.560	1.44
4	3	5	2.410	10.800	2.840	3.50
5	3	12	4.840	16.000	4.060	1.44
6	4	5	0.180	0.800	0.200	3.10
7	4	11	2.090	6.880	1.740	1.44
8	5	6	1.190	5.400	1.420	1.75
9	5	8	0.0	2.670	0.0	
10	5	11	2.030	6.820	1.740	1.44
11	6	7	0.450	2.080	0.540	1.75
12	7	12	0.860	3.400	0.860	1.60
13	8	9	0.240	3.050	116.200	15.50
14	8	30	0.430	5.040	51.400	7.76
15	9	10	0.260	3.220	123.000	15.50
16	11	12	0.590	1.960	0.500	1.44
17	11	13	2.220	7.310	1.880	1.44
18	12	14	2.150	7.070	1.820	1.44
19	12	16	2.120	8.340	2.140	1.60
20	12	117	3.290	14.000	3.580	1.60
21	13	15	7.440	24.440	6.260	1.44
22	14	15	5.950	19.500	5.020	1.44
23	15	17	1.320	4.370	4.440	2.88
24	15	19	1.200	3.940	1.000	1.44
25	15	33	3.800	12.440	3.200	1.44
26	16	17	4.540	18.010	4.660	1.60
27	17	18	1.230	5.050	1.280	3.50
28	17	30	0.0	3.880	0.0	
29	17	31	4.740	15.630	4.000	1.44

30	17	113	0.910	3.010	0.760	3.11
31	18	19	1.110	4.930	1.140	2.92
32	19	20	2.520	11.700	2.980	1.75
33	19	34	7.520	24.700	6.320	1.44
34	20	21	1.830	8.490	2.160	1.75
35	21	22	2.090	9.700	2.460	1.75
36	22	23	3.420	15.900	4.040	1.75
37	23	24	1.350	4.920	4.980	3.20
38	23	25	1.560	8.000	8.640	1.87
39	23	32	3.170	11.530	11.720	2.88
40	24	70	10.220	41.150	10.200	1.60
41	24	72	4.880	19.600	4.880	1.60
42	25	26	0.0	3.820	0.0	
43	25	27	3.180	16.300	17.640	3.74
44	26	30	0.790	8.600	90.800	7.17
45	27	28	1.910	8.550	2.160	1.75
46	27	32	2.290	7.550	1.920	1.44
47	27	115	1.640	7.410	1.980	1.44
48	28	29	2.370	9.430	2.380	1.75
49	29	31	1.080	3.310	0.820	1.44
50	30	38	0.460	5.400	42.200	7.17
51	31	32	2.980	9.850	2.500	1.44
52	32	113	6.150	20.300	5.180	3.11
53	32	114	1.350	6.120	1.620	1.75
54	33	37	4.150	14.200	3.660	1.44
55	34	36	0.870	2.680	0.560	1.75
56	34	37	0.260	0.940	0.980	3.16
57	34	43	4.130	16.810	4.220	1.60
58	35	36	0.220	1.020	0.260	1.60
59	35	37	1.100	4.970	1.320	1.75
60	37	38	0.0	3.750	0.0	
61	37	39	3.210	10.600	2.700	1.44
62	37	40	5.930	16.800	4.200	3.16
63	38	65	0.900	9.860	104.600	7.17
64	39	40	1.840	6.050	1.540	1.44
65	40	41	1.450	4.870	1.220	1.44
66	40	42	5.550	18.300	4.660	1.44
67	41	42	4.100	13.500	3.440	1.44
68	42	49	3.580	16.100	17.200	3.50

69	43	44	6.080	24.540	6.060	1.60
70	44	45	2.240	9.010	2.240	1.60
71	45	46	4.000	13.560	3.320	1.44
72	45	49	6.840	18.600	4.440	1.75
73	46	47	3.800	12.700	3.160	1.44
74	46	48	6.010	18.900	4.720	1.44
75	47	49	1.910	6.250	1.600	1.44
76	47	69	8.440	27.780	7.100	1.44
77	48	49	1.790	5.050	1.260	1.44
78	49	50	2.670	7.520	1.860	3.16
79	49	51	4.860	13.700	3.420	3.16
80	49	54	3.980	14.500	14.680	3.20
81	49	66	0.900	4.590	4.960	9.32
82	49	69	9.850	32.400	8.280	1.44
83	50	57	4.740	13.400	3.320	3.16
84	51	52	2.030	5.880	1.400	3.16
85	51	58	2.550	7.190	1.780	3.16
86	52	53	4.050	16.350	4.040	1.60
87	53	54	2.630	12.200	3.100	1.75
88	54	55	1.690	7.070	2.020	3.50
89	54	56	0.270	0.950	0.720	2.60
90	54	59	5.030	22.930	5.980	5.14
91	55	56	0.480	1.510	0.380	1.44
92	55	59	4.730	21.580	5.640	1.75
93	56	57	3.430	9.660	2.420	3.16
94	56	58	3.430	9.660	2.420	3.16
95	56	59	4.070	12.000	11.040	2.30
96	59	60	3.170	14.500	3.760	1.75
97	59	61	3.280	15.000	3.880	1.75
98	59	63	0.0	3.860	0.0	
99	60	61	0.260	1.350	1.460	1.87
100	60	62	1.230	5.610	1.460	1.75
101	61	62	0.820	3.760	0.980	1.75
102	61	64	0.0	2.680	0.0	
103	62	66	4.820	21.800	5.780	1.75
104	62	67	2.580	11.700	3.100	1.75
105	63	64	0.170	2.000	21.600	7.76
106	64	65	0.270	3.020	38.000	7.76
107	65	66	0.0	3.700	0.0	

108	65	68	0.140	1.600	63.800	14.93
109	66	67	2.240	10.150	2.680	1.75
110	68	69	0.0	3.700	0.0	
111	68	81	0.170	2.020	80.800	7.17
112	68	116	0.030	0.400	16.400	
113	69	70	3.000	12.700	12.200	1.60
114	69	75	4.050	12.200	12.400	1.44
115	69	77	3.090	10.100	10.380	1.44
116	70	71	0.880	3.550	0.860	1.60
117	70	74	4.010	13.230	3.360	1.44
118	70	75	4.280	14.100	3.600	1.44
119	71	72	4.460	18.000	4.440	1.60
120	71	73	0.870	4.540	1.180	1.87
121	74	75	1.230	4.060	1.020	1.44
122	75	77	6.010	19.990	4.980	1.44
123	75	118	1.450	4.810	1.180	1.44
124	76	77	4.440	14.800	3.680	1.44
125	76	118	1.640	5.440	1.360	1.44
126	77	78	0.370	1.240	1.260	1.44
127	77	80	1.080	3.310	7.000	2.54
128	77	82	2.980	8.530	8.180	1.27
129	78	79	0.540	2.440	0.640	1.75
130	79	80	1.560	7.040	1.860	1.75
131	80	81	0.0	3.700	0.0	
132	80	96	3.560	18.200	4.940	1.87
133	80	97	1.830	9.340	2.540	1.87
134	80	98	2.380	10.800	2.860	1.75
135	80	99	4.540	20.600	5.460	1.75
136	82	83	1.120	3.660	3.800	2.88
137	82	96	1.620	5.300	5.440	1.44
138	83	84	6.250	13.200	2.580	2.03
139	83	85	4.300	14.800	3.480	1.44
140	84	85	3.020	6.410	1.220	1.87
141	85	86	3.500	12.300	2.760	1.44
142	85	88	2.000	10.200	2.760	1.87
143	85	89	2.390	17.300	4.700	1.87
144	86	87	2.820	20.740	4.440	2.01
145	88	89	1.390	7.120	1.920	1.87
146	89	90	1.580	6.530	15.880	7.48

147	89	92	0.790	3.800	9.620	3.74
148	90	91	2.540	8.360	2.140	1.44
149	91	92	3.870	12.720	3.260	1.94
150	92	93	2.580	8.480	2.180	1.44
151	92	94	4.810	15.800	4.060	1.44
152	92	100	6.480	29.500	7.720	1.75
153	92	102	1.230	5.590	1.460	1.75
154	93	94	2.230	7.320	1.880	1.44
155	94	95	1.320	4.340	1.100	1.44
156	94	96	2.690	8.690	2.300	1.44
157	94	100	1.780	5.800	6.040	2.88
158	95	96	1.710	5.470	1.480	1.44
159	96	97	1.730	8.850	2.400	1.87
160	98	100	3.970	17.900	4.760	1.75
161	99	100	1.800	8.130	2.160	1.75
162	100	101	2.770	12.620	3.280	1.75
163	100	103	1.600	5.250	5.360	1.44
164	100	104	4.510	20.400	5.400	1.75
165	100	106	6.050	22.900	6.200	1.75
166	101	102	2.460	11.200	2.940	1.75
167	103	104	4.660	15.840	4.060	1.44
168	103	105	5.350	16.250	4.080	1.44
169	103	110	3.910	18.130	4.600	1.75
170	104	105	0.990	3.780	0.980	1.44
171	105	106	1.400	5.470	1.440	1.44
172	105	107	5.300	18.300	4.720	1.44
173	105	108	2.610	7.030	1.840	1.27
174	106	107	5.300	18.300	4.720	1.44
175	108	109	1.050	2.880	0.760	1.27
176	109	110	2.780	7.620	2.020	1.27
177	110	111	2.200	7.550	2.000	1.44
178	110	112	2.470	6.400	6.200	1.27
179	114	115	0.230	1.040	0.280	1.75

APÊNDICE 4

DADOS DE LIMITES FÍSICOS DAS MÁQUINAS SISTEMA IEEE

BARRA	MÍNIMO	MÁXIMO	NOMINAL
04	-0.09	-0.0900	0.0000
10	0.00	6.5000	6.5000
12	0.00	1.0000	1.0000
25	0.00	2.5000	2.5000
26	0.00	3.5000	3.5000
27	-0.09	-0.0900	0.0000
31	0.00	0.1000	0.0000
40	-0.46	-0.4600	0.0000
42	-0.59	-0.5900	0.0000
49	0.00	2.5000	2.5000
59	0.00	2.0000	2.0000
61	0.00	2.0000	2.0000
65	0.00	4.0000	4.0000
66	0.00	4.0000	4.0000
69	0.00	5.5000	5.5000
80	0.00	5.0000	5.0000
89	0.00	6.5000	6.5000
90	-0.85	-0.8500	0.0000
100	0.00	3.0000	3.0000
112	-0.43	-0.4300	0.0000